

SÉRIE A, n° 1339

N° D'ORDRE :

2208

# THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES  
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

**PAN TCHENG KAO**

LICENCIÉ ÈS SCIENCES, INGÉNIEUR CIVIL DES P. T. T.,  
INGÉNIEUR DIPLOMÉ I. E. G., E. S. E.,  
E. S. E. RADIO.

---

**1<sup>re</sup> THÈSE.** — ETUDE EXPÉRIMENTALE DE LA VITESSE DE PROPAGATION DES ULTRA-SONS DANS DES GAZ.

**2<sup>e</sup> THÈSE.** — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 4 Novembre 1931 devant la Commission d'examen

|                |                      |
|----------------|----------------------|
| MM. FABRY..... | <i>Président.</i>    |
| GUILLET.....   | } <i>Examineurs.</i> |
| DARMOIS.....   |                      |

---

**PARIS**

**MASSON ET C<sup>ie</sup>, ÉDITEURS**

LIBRAIRES DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE

120, BOULEVARD SAINT-GERMAIN

—  
1931



SÉRIE A, n° 1339

N° D'ORDRE :

2208

# THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES  
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

**PAN TCHENG KAO**

LICENCIÉ ÈS SCIENCES, INGÉNIEUR CIVIL DES P. T. T.,  
INGÉNIEUR DIPLOMÉ I. E. G., E. S. E.,  
E. S. E. RADIO.

---

**1<sup>re</sup> THÈSE.** — ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE LA VITESSE DE PROPAGATION DES ULTRA-SONS DANS DES GAZ.

**2<sup>e</sup> THÈSE.** — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 4 Novembre 1931 devant la Commission d'examen

|                |                     |
|----------------|---------------------|
| MM. FABRY..... | } <i>Président.</i> |
| GUILLET.....   |                     |
| DARMOIS.....   |                     |

*Examineurs.*

---

**PARIS**

**MASSON ET C<sup>ie</sup>, ÉDITEURS**

LIBRAIRES DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE

120, BOULEVARD SAINT-GERMAIN

—  
1931

# FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

MM.

*Doyen*..... C. MAURAIN, *Professeur*, Physique du globe.

*Doyen honoraire*.... M. MOLLIARD.

*Profess. honoraires*.. { H. LE CHATELIER. A. LEDUC.  
H. LEBESGUE. E. HEROUARD.  
A. FERNBACH.

|                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><i>Professeurs</i> .....</p> | <p>EMILE PICARD..... Analyse supérieure et algèbre supér.<br/>E. GOURSAT..... Calcul différentiel et calcul intégral.<br/>G. KOENIGS..... Mécanique physique et expérimentale.<br/>P. JANET..... Electrotechnique générale.<br/>F. WALLERANT... Minéralogie.<br/>P. PAINLEVÉ..... Mécanique anal. et mécanique céleste.<br/>M. CAULLERY.... Zoologie (Evolution des êtres organisés)<br/>ÉMILE BOREL..... Calcul des probabilités et phys. mathém.<br/>H. ABRAHAM..... Physique.<br/>M. MOLLIARD.... Physiologie végétale.<br/>E. CARTAN..... Géométrie supérieure.<br/>GABRIEL BERTRAND Chimie biologique.<br/>JEAN PERRIN.... Chimie physique.<br/>L. LAPICQUE..... Physiologie générale.<br/>M<sup>me</sup> P. CURIE..... Physique générale et radioactivité.<br/>G. URBAIN..... Chimie minérale.<br/>L. MARCHIS..... Aviation.<br/>E. VESSIOT..... Théorie des fonct. et th. des transf.<br/>A. COTTON..... Physique générale.<br/>J. DRACH..... Application de l'analyse à la géométrie.<br/>CHARLES FABRY... Physique.<br/>R. LESPIEAU..... Théories chimiques.<br/>P. PORTIER..... Physiologie comparée.<br/>CHARLES PÉREZ... Zoologie.<br/>E. BLAISE..... Chimie organique.<br/>P.-A. DANGEARD.. Botanique.<br/>RÉMY PERRIER... Zoologie (Enseignement P. C. N.).<br/>LÉON BERTRAND... Géolog. structurale et géolog. appliquée.<br/>E. RABAUD..... Biologie expérimentale.<br/>G. JULIA..... Mathématiques générales.<br/>PAUL MONTEL.... Mécanique rationnelle.<br/>V. AUGER..... Chimie appliquée.<br/>P. WINTREBERT.. Anatomie et histologie comparées.<br/>O. DUBOSQ..... Biologie maritime.<br/>EUGÈNE BLOCH... Physique théorique et phys. céleste.<br/>A. MAILHE..... Etude des combustibles.<br/>L. LUTAUD..... Géogr. physique et géol. dynamique.<br/>HENRI VILLAT... Mécanique des fluides et applications.<br/>CH. JACOB..... Géologie.<br/>P. PASCAL..... Chimie minérale.<br/>LÉON BRILLOUIN.. Théories physiques.<br/>E. ESCLANGON... Astronomie.<br/>H. BENARD..... Mécanique expérimentale des fluides.<br/>G. MAUGUIN..... Minéralogie.<br/>L. BLARINGHEM.. Botanique.</p> |
|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>E. PÉCHARD.... Chimie (Ens. P. C. N.).<br/>A. GUILLET.... Physique.<br/>M. GUICHARD... Chimie minérale.<br/>A. MICHEL-LEVY Pétrographie.<br/>A. DEREIMS.... Géologie.<br/>A. DENJOY..... Calcul diff. et int.<br/>H. MOUTON.... Chimie physique.<br/>A. DUFOUR.... Physique (P. C. N.).<br/>L. DUNOYER... Optique appliquée.<br/>M. JAVILLIER... Chimie biologique.<br/>ROBERT-LEVY... Zoologie.<br/>A. DEBIERNE... Radioactivité.<br/>E. DARMOIS.... Physique.<br/>G. BRUHAT.... Physique.<br/>A. GUILLIERMOND Botanique (P.C.N.).</p> | <p>F. PICARD..... Zool. (Ev. êtres org.).<br/>L. JOLEAUD..... Paléontologie.<br/>M. FRECHET..... Calcul des probabilités<br/>et phys. mathém.<br/>M<sup>me</sup> RAMART-LUCAS Chimie organique.<br/>BEGHIN..... Méc. théor. des fluides.<br/>FOCH..... Méc. expér. des fluides.<br/>PAUTHENIER... Mécanique des fluides.<br/>VILLEY..... Méc. phys. et expér.<br/>De BROGLIE.... Théories physiques.<br/>LABROUSTE.... Physique du Globe.<br/>FREUNDLER.... Chimie (P. C. N.).<br/>PRENANT..... Zoologie.<br/>P. JOB..... Chimie générale.<br/>CHRETIEN..... Optique appliquée.</p> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

*Secrétaire*..... A. PACAUD



A LA MÉMOIRE DE MA MÈRE

A MON PÈRE

A MES SŒURS ET FRÈRE



A MON MAITRE MONSIEUR CH. FABRY  
Membre de l'Institut  
Professeur à la Faculté des Sciences de Paris

*Hommage de respectueuse affection  
et de profonde gratitude.*



A MES MAITRES

MESSIEURS A. GUILLET ET E. DARMOIS  
Professeurs à la Faculté des Sciences de Paris

*Témoignage de respectueuse reconnaissance.*



# ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE LA VITESSE DE PROPAGATION DES ULTRA-SONS DANS DES GAZ

Par PAN TCHENG KAO

## CHAPITRE PREMIER

### Historique.

§ 1. — Pierce a le premier en 1925, appliqué l'oscillateur à quartz à la mesure de la vitesse de propagation des ultra-sons dans les gaz (1). Le principe de sa méthode est le même que celui employé par Langevin pour le sondage sous-marin, seules les inconnues à déterminer diffèrent : la distance pour l'un, la vitesse pour l'autre. Cependant la méthode de Pierce se différencie de celle de Langevin en ce qu'il opère en « régime permanent » au lieu de faire emploi d'un simple ébranlement. Il ne mesure pas non plus directement la durée de propagation mais la fréquence des oscillations entretenues.

**Principe.** — Les vibrations du quartz sont entretenues par triode. Toute surface vibrante du quartz devient une source et émet dans l'air un faisceau plus ou moins ouvert d'ondes ultra-sonores. Normalement au faisceau est placé un réflecteur plan que l'on peut rapprocher ou éloigner de la source à l'aide d'une vis micrométrique. Aucun appareil supplé-

(1) C. W. PIERCE. — *Proc. Amer. Acad. of Arts and Sciences*, vol. 60 (1925), p. 271.

mentaire n'est nécessaire pour détecter les ondes ultra-sonores, car les ondes réfléchies réagissent sur la surface émettrice du quartz pour produire une modification du courant plaque suivant la différence de phase relative des deux ondes émise et réfléchie. Si l'on traduit par un graphique la variation de ce courant en fonction du déplacement du réflecteur, on obtient une courbe à allure sinusoïdale plus ou moins déformée avec des maxima aigus, appelés « pics », espacés d'une demi-longueur d'onde. D'autre part, un oscillateur à quartz donne, de lui-même, une fréquence très stable qu'il est facile de mesurer ; d'où la vitesse de propagation par la formule bien connue :

$$V = f.\lambda.$$

**Résultats.** — Après avoir montré expérimentalement que la modification de fréquence du quartz par la réaction des ondes réfléchies est négligeable, Pierce a trouvé les résultats suivants :

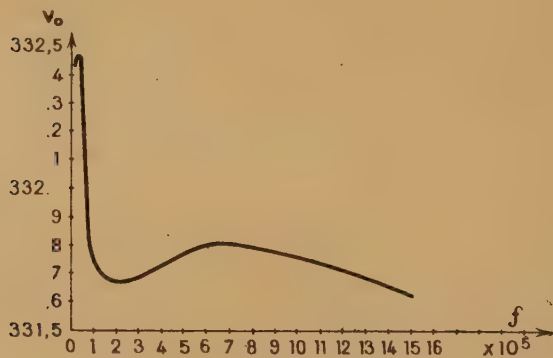


Fig. 1.

1° Dans l'air. — La vitesse de propagation, ramenée à  $0^\circ \text{ C}$ , présentait un maximum vers  $f=42$  kilocycles (fig. 1). Ce résultat lui ayant paru douteux, il répéta l'expérience en

montant l'un au-dessus de l'autre deux quartz dont l'un avait une fréquence correspondant au maximum et l'autre, une fréquence très différente, de façon à mesurer simultanément les deux longueurs d'onde dans les mêmes conditions de température, de composition d'air, etc. : le même écart persista. En outre, il pense que l'air doit être « opaque » aux ondes de fréquences beaucoup plus élevées ( $f > 3.10^6$ ) car il n'a pu observer alors aucune réaction provenant du réflecteur. Il affirmait que l'influence d'une faible humidité de l'air était négligeable ; par contre l'enveloppe de l'appareil avait pour effet de réduire légèrement la vitesse ; cet effet disparût quand il prit soin de revêtir l'enveloppe d'une doublure de 3 cm. de coton.

2° *Dans le gaz carbonique.* — La vitesse, dans le gaz carbonique commercial non desséché, augmentait continuellement jusqu'à  $f = 200$  kilocycles, limite de ses expériences. De plus, l'absorption a été trouvée très importante dans le gaz carbonique à tel point qu'à la fréquence de  $10^6$ , il devenait pratiquement opaque même sur une couche de quelques millimètres. Cette grande absorption se traduisait par un décroissement rapide de l'amplitude de variation du courant-plaque en fonction de l'augmentation de la colonne de gaz interposée entre la source et le réflecteur. Pierce utilisa cette propriété pour comparer le pouvoir absorbant de différents gaz, en mesurant la longueur de la colonne de gaz à interposer pour produire une même diminution donnée de l'amplitude de variation du courant-plaque. Il faisait remarquer avec raison que les conditions de fonctionnement dépendaient également de la distance totale source-réflecteur. Quand cette distance est faible, c'est-à-dire pour les gaz très absorbants, les ondes sont relativement planes ; tandis que quand elle est grande — gaz peu absorbants — l'effet de diffraction se faisait sentir, la diminution d'amplitude est due à la fois à l'absorption et à la divergence du faisceau. Cette méthode n'est donc que qualitative.

Depuis, plusieurs auteurs ont utilisé l'appareil de Pierce pour différentes mesures, je citerai en particulier les travaux de H. Pielemeier (2) et de C. D. Reid (3).

§ 2. — Pielemeier a signalé le premier l'existence des « bosses » ou maxima secondaires sur la courbe donnant la variation du courant-plaque en fonction du déplacement du réflecteur, bosses que nous avons observées également dès le début de notre travail. Pour expliquer la formation de ces bosses, il invoquait la variation de vitesse de propagation avec l'intensité des ondes, variation déjà observée par Regnault et confirmée plus récemment par Foley (4), Hitchcock (5), etc. Il la rendait également responsable des irrégularités observées sur l'espacement des maxima principaux ou pics et il concluait que la précision prétendue par Pierce dans la mesure de cette vitesse devrait être considérablement diminuée.

Passant ensuite à l'absorption, Pielemeier rappelle que le coefficient d'absorption « A » de Lebedew est défini par :

$$I = I_0 e^{- (A/\lambda^2)x}$$

ou :

$$A = \left( \log \cdot \frac{I_1}{I_2} \right) \frac{\lambda^2}{(x_2 - x_1)}.$$

Pour mesurer « A », voici comment il procède. Il relève sur un diagramme, obtenu en portant en abscisses les positions du réflecteur et en ordonnées les déviations du galvanomètre, les points représentatifs d'un grand nombre de

(2) H. PIELEMEIER. — *Phys. Rev.*, vol. 34 (1929), p. 1184.

(3) C. D. REID. — *Phys. Rev.*, vol. 35 (1930), p. 814 et vol. 37 (1931), p. 1147.

(4) A. L. FOLEY. — *Phys. Rev.*, vol. 16 (1920), p. 449.

(5) R. C. HITCHCOCK. — *Proc. Inst. Radio Eng.*, vol. 15 (1927), p. 907.

maxima et de minima successifs du courant plaque (fig. 2). En réunissant les maxima par une courbe (I) et les minima par une autre (II), on aura l'amplitude de variation du courant plaque «  $\alpha$  », pour une position donnée du réflecteur, par la différence des ordonnées correspondantes sur les courbes (I) et (II). La courbe (III) donne le  $\log. \alpha$  en fonction de la position du réflecteur ; pour deux positions du réflecteur

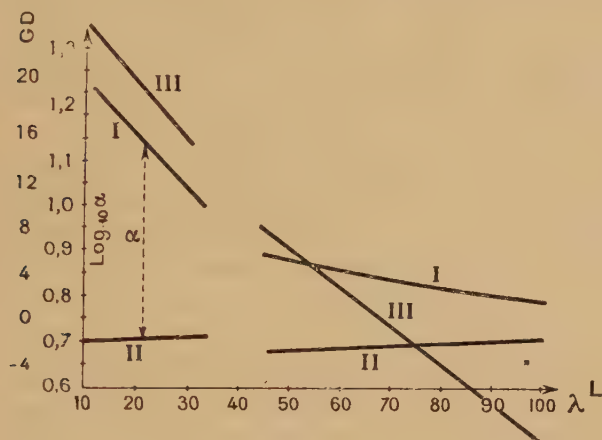


Fig. 2.

distantes de  $1/2$  cm. ou pour une distance parcourue par les ondes  $x_2 - x_1 = 1$  cm., la différence des ordonnées correspondantes sur la courbe (III),  $\log. \alpha_1 - \log. \alpha_2$ , sera égale à  $A/\lambda^2$ , si l'on admet la proportionnalité entre  $\alpha$  et I. Ce point a été d'ailleurs vérifié par Pielemeier par des essais directs avec un moulinet à torsion dans le cas où l'absorption était assez forte.

On est naturellement tenté d'opérer près du quartz afin que les ondes restent planes et l'effet de diffraction négligeable, mais Pielemeier constata alors que le coefficient «  $A$  » ainsi trouvé était beaucoup trop grand ; tandis qu'au contraire, à partir d'un écartement convenable, la

valeur mesurée s'accorde bien avec la valeur théorique de « A » cela provient de ce que la courbe (III) est composée de deux droites inégalement inclinées, à la jonction desquelles, et c'est là une chose curieuse à remarquer, Pielemeier laisse une zone de discontinuité sur une vingtaine de  $\lambda/2$  (fig. 2). Il relate en outre qu'une variation dans l'espacement des maxima a été observée au début de cette zone. Pielemeier incriminerait encore volontiers la variation de vitesse avec l'intensité ; quant à la grande absorption près du quartz, il l'explique par des réflexions successives des ondes entre le quartz et le réflecteur.

§ 3. — C. D. Reid (3) entreprit, sous la direction de Pierce, des expériences de contrôle du travail de ce dernier (§ 1) pour élucider en particulier le relèvement de la vitesse du son dans l'air aux environs de 42 kC. Après avoir étudié avec soin les quatre facteurs intéressant le phénomène : la fréquence, la température, l'humidité et la longueur d'onde, il affirme une décroissance asymptotique de cette dernière en fonction de la distance réflecteur-source et trouve par la suite (6) que la vitesse dans l'air tend vers une valeur-limite de  $V = 331,63$  m./sec.  $\pm 0,01$  0/0 indépendamment de la fréquence dans la gamme expérimentée c'est-à-dire entre 42 et 140 kC.

Voici les moyens de contrôle et d'investigation qu'il a employés :

**Fréquences.** — Les quartz sont taillés de telle sorte que chacun d'eux possède une fréquence dont une harmonique donne avec un même quartz étalon des battements audibles. La fréquence des battements est mesurée au moyen d'un fréquencemètre acoustique ; le rang de l'harmonique intéressée est identifié à l'aide d'un ondemètre.

(6) C. D. REID. — *Phys. Rev.*, vol. 37 (1931), p. 1147.

**Température.** — Le thermomètre étalon employé est à mercure, gradué au  $1/10^{\circ}$  de degré C. Pour obtenir une température bien constante, la boîte de l'interféromètre, contenant le gaz expérimenté, est placée en sous-sol, isolée du reste de l'appareil et de l'opérateur ; cette pièce ne possède ni fenêtre ni système de chauffage. Durant une série de mesures ( $1/2$  heure), l'indication du thermomètre varie rarement d'une façon appréciable.

**Humidité.** — Pour obtenir et maintenir un état hygrométrique déterminé, il emploie une solution saline contenant un excès de phase solide. Un hygromètre à cheveu sert en outre comme indicateur de contrôle. L'air est d'autre part privé de gaz carbonique. D'accord avec Pierce, Reid apporte une rectification à cette conclusion de Pierce qu'une faible humidité avait une influence négligeable. La vitesse est conforme, au contraire, à la variation de densité.

**Longueur d'onde.** — Les mesures de longueur d'onde sont faites à l'aide d'une vis micrométrique en déplaçant le réflecteur d'abord constamment dans un sens, puis dans le sens opposé. Les positions obtenues dans les deux sens pour un même pic ne coïncident pas et leur écart n'est pas constant. Le parallélisme entre le réflecteur et la surface émettrice du quartz est réalisé à l'estime en basculant le quartz jusqu'à l'obtention du maximum de l'effet de réaction du réflecteur, ce dernier étant très loin de la source.

L'erreur possible sur la vitesse est estimée à 0,01 0/0 en admettant toutefois comme vitesse le produit  $\lambda f$  et comme  $\lambda$  le double de l'intervalle entre deux pics consécutifs du courant plaque. Comme cet intervalle varie suivant sa distance à la source, Reid prenait la longueur d'onde moyenne par tronçons de 15 cm. environ et la considérait comme celle correspondant au milieu du tronçon. Les résultats sont traduits en deux graphiques : on voit sur l'un que la vitesse

tend vers une limite à mesure qu'augmente la distance comptée en  $\lambda$  entre le milieu du tronçon et la source ; sur l'autre (fig. 3), que la dispersion apparente du son diminue à mesure qu'augmente la même distance en centimètres considérée comme paramètre.

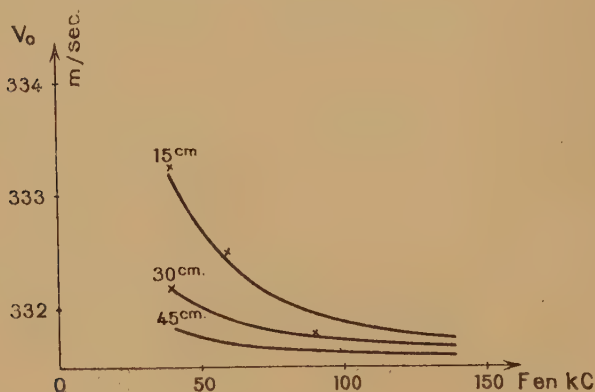


Fig. 3.

#### Cause de l'augmentation de vitesse près de la source. —

Le décrement logarithmique de la décroissance des pics pour 42 kC a été trouvé égal à 0,0015 par  $\lambda/2$ , ceci a été jugé trop faible pour affecter sensiblement la valeur de  $\lambda$ . Il en est de même si l'on considère l'intensité du son ou le défaut de planéité des ondes. Enfin, l'effet de la forme des surfaces émettrices est difficile à étudier : il n'est pas commode d'avoir des quartz de même fréquence ayant des surfaces très différentes ; la variation de surface peut cependant affecter la vitesse près du quartz.

D'après l'historique précédent, on voit que la variation de la vitesse des ultra-sons avec la fréquence, d'abord affirmée par Pierce, est niée ensuite par Reid. Le mémoire de ce dernier a paru pendant la rédaction de mes recherches qui avaient précisément pour but la vérification du résultat

de Pierce. J'ai repris les mesures de la vitesse des ultra-sons en apportant à l'appareillage de Pierce une série de perfectionnements et nous verrons que nos conclusions sont d'accord avec celles de Reid.

Mon travail a été effectué au Laboratoire d'enseignement de la physique à la Sorbonne où M. Ch. Fabry a bien voulu m'accueillir. Qu'il trouve ici l'expression de ma très grande reconnaissance. Je me fais également un plaisir de remercier M. Décombe, sous-directeur, ainsi que tout le personnel du Laboratoire, qui m'a beaucoup facilité ma tâche. Je remercie aussi MM. de Gramont et Tournier pour quelques-uns des quartz qui m'ont servi dans mes expériences, MM. Ch. Ed. Guillaume et Pérard pour l'étalonnage du thermomètre à résistance, MM. Bedeau et de Mare pour le prêt du diapason qui m'a été indispensable pour la mesure des fréquences, MM. Jouaust et Deceaux pour l'étalonnage de ce diapason.

---

## CHAPITRE II

### Mesure de la longueur d'onde.

Nous avons vu dans le chapitre premier que la mesure de la vitesse de propagation repose sur la relation fondamentale  $V = f\lambda$ . Nous y avons vu également le principe de l'interféromètre acoustique de Pierce. Si ce principe est des plus simples, sa réalisation demande beaucoup de précautions, si l'on veut éviter les perturbations, afin d'obtenir des mesures précises. Nous discuterons la précision dans le chapitre IV.

Je donnerai ici la description de l'interféromètre (§ 4) en insistant sur les perfectionnements que j'y ai apportés (§ 5) et les précautions à prendre (§ 6).

§ 4. — **Description de l'interféromètre acoustique.** — Les figures 4 et 5 montrent, en plan et en élévation, l'interféromètre construit dans les ateliers de notre laboratoire. Il se compose d'une plaque d'ardoise A de  $50 \times 70$  cm. et de 2 cm. d'épaisseur, sur laquelle sont fixées : à l'une des extrémités, la lunette autocollimatrice  $l$  ; à l'extrémité opposée, une plaque P munie d'un support circulaire S pour le quartz ; dans la région centrale, deux glissières parallèles  $G_1$  et  $G_2$ , formées chacune par deux barres d'acier étirées  $b$  de 2 cm. de diamètre et de 45 cm. de longueur et écartées de 10 cm. d'axe en axe. Sur la glissière antérieure peut se déplacer le chariot  $C_1$  portant le microscope viseur M et sur la postérieure le chariot  $C_2$  porteur du réflecteur R. Ce dernier chariot est à l'intérieur de l'enveloppe calorifugée

non représentée sur les figures ; il peut être déplacé de l'extérieur par une tige filetée V et un système d'arrêt B, combinés de telle sorte que l'on puisse lui donner à volonté, soit un déplacement rapide de longue course, soit au contraire un mouvement très doux permettant un ajustage à un micron près, sans le moindre à-coup.

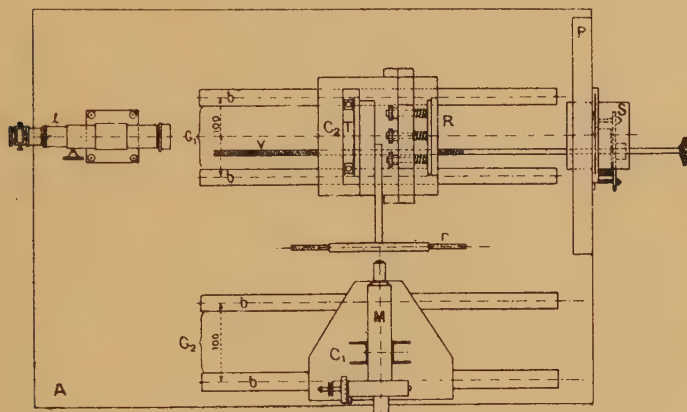


Fig. 4.

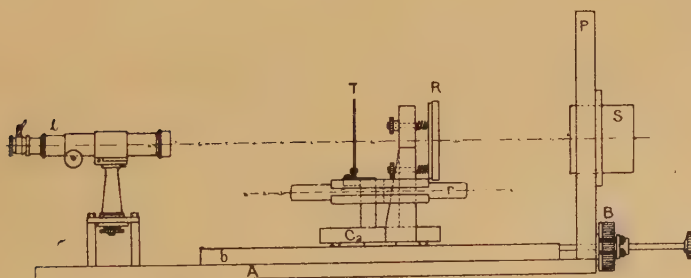


Fig. 5.

Ce chariot  $C_2$  porte en outre un thermomètre à résistance de platine T et une règle graduée horizontale  $r$  de 20 cm. que l'on vise au microscope M à travers une fenêtre fermée par une glace. On peut donc mesurer directement des

déplacements du réflecteur inférieurs à 20 cm., sans avoir besoin de déplacer le microscope ; c'est le cas pour la plupart de nos mesures. En utilisant de plus le déplacement du microscope, la course maxima du réflecteur, limitée seulement par la dimension de l'enveloppe, peut atteindre 28 cm. Ce chariot est lourdement chargé par des masses de plomb à sa partie inférieure, afin d'abaisser le plus possible son centre de gravité, et pour l'appliquer sur sa glissière. Le glissement du chariot se fait par cinq points de contact dont quatre avec la barre directrice.

La tige filetée commandant le glissement du chariot est parallèle à la barre directrice et aussi près que possible de cette barre, de manière à réduire le couple qui tendrait à faire dérailler le chariot. Elle est prise entre les mâchoires taraudées du chariot, quand l'embrayage est fait. Pour la débrayer, il suffit d'écarter l'une des mâchoires pour laisser passer la tige filetée : on peut ainsi enlever le chariot de la glissière sans être obligé de dévisser complètement la tige. Cette tige traverse d'autre part la plaque latérale P portant le support du quartz. En tirant sur la partie émergente de cette tige, une fois embrayée, on obtient un déplacement rapide du chariot. Au contraire, si on l'oblige à tourner sur place, on fait déplacer le chariot très lentement.

Le réflecteur R est un disque de verre de 10 cm. de diamètre et de 8 mm. d'épaisseur. Sa surface réfléchissante a été travaillée optiquement à une frange près. Il est agrafé en trois points sur un support en laiton percé d'un trou central ; des précautions ont été prises pour éviter des efforts mécaniques pouvant altérer sa planéité. Trois vis calantes avec des ressorts antagonistes permettent le réglage de son orientation.

Le support du quartz a été agencé de manière à pouvoir le retirer hors de l'enveloppe quand on veut changer de quartz par exemple, sans laisser rentrer de l'air humide, ce qui est toujours précieux. La figure 6 nous montre le dispositif.

L'enveloppe est constituée par une cloche rectangulaire amovible et reposant sur la plaque d'ardoise A lui servant de fond. Cette cloche est en réalité double : la cloche externe est en bois calorifugée d'une couche de feutre. La cloche interne est en zinc. Elle est munie intérieurement d'une tenture en feutre de coton de 3 mm. d'épaisseur servant à

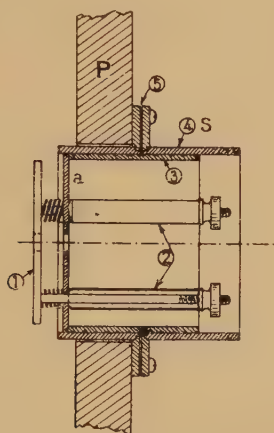


Fig. 6. — *Support du quartz.*

LÉGENDE : (1) Platine sur laquelle est fixée la monture du quartz ; (2) Système de réglage de l'orientation du quartz muni de puissants ressorts ; (3) Tube de gros diamètre fermé à une extrémité (a) pouvant glisser à frottement doux dans le tube (4) qui est coupé en deux morceaux réunis par une boîte extrêmement plate (5), dans laquelle on introduit une plaque obturatrice, avant que le tube (3) ne quitte complètement le tube (4).

amortir et à diffuser les ultra-sons parasites, et extérieurement d'un dispositif chauffant électrique servant à dessécher rapidement la tenture interne.

Je signale enfin que l'appareil est muni d'un agitateur-ventilateur de gaz.

§ 5. — **Perfectionnements.** — Nous signalerons comme perfectionnements obtenus au cours de notre étude, les points suivants :

1° *Séparation du dispositif de commande et de mesure de déplacement du réflecteur.* — La vis micrométrique employée par Pierce est remplacée par une tige filetée ordinaire, qui ne sert qu'à déplacer le chariot du réflecteur, tandis que le mouvement de ce dernier est lu sur une règle solidaire à l'aide d'un microscope muni d'un oculaire micrométrique.

Le réglage du parallélisme de la règle avec la direction du déplacement du chariot du réflecteur est fait d'après la profondeur du champ du microscope, qui permet d'apercevoir un écart inférieur à  $\pm 1/20^e$  de mm. En mettant au point successivement les deux extrémités de la règle (20 cm.) en agissant sur celle-ci, on arrive à un parallélisme pratiquement parfait (erreur inférieure à  $1/100\ 000^e$ ).

La règle est en verre, elle est graduée au  $1/10^e$  de mm. sur une longueur de 20 cm. ; sa graduation est très régulière ; les traits centimétriques ont été comparés avec un étalon secondaire délivré par le B. I. P. M. avec table de correction.

2° *Contrôle du parallélisme entre la source et le réflecteur par autocollimation ; orientation de leurs plans perpendiculairement au déplacement du réflecteur.* — Il suffit pour cela de rendre d'abord l'axe de la lunette autocollimatrice parallèle à l'axe de la barre directrice de la glissière. Une fois ce parallélisme obtenu, on rend successivement les plans de la source et du réflecteur normaux à cette direction par autocollimation, en agissant sur leurs vis de réglage. Le succès de l'opération repose sur le réglage préalable du parallélisme des deux barres de la glissière : ce parallélisme s'obtient facilement en réglant leur écartement au pied à coulisse à  $1/50^e$  de mm. près ; sur une longueur de 40 cm., cela fait un angle d'écart de l'ordre de  $10''$ . Bien entendu, les

barres doivent être choisies bien droites. Ce choix se fait facilement par autocollimation. En effet, si la barre directrice est un peu cintrée, en promenant dessus le réflecteur, celui-ci tournera, en plus du mouvement de translation ; l'image des réticules se déplacera dans le champ de la lunette. Les deux barres étant ainsi choisies et mises en place avec un parallélisme aussi parfait que possible, on met en place le chariot avec le réflecteur, on rend l'axe optique de la lunette normal au plan du réflecteur par autocollimation. Mais en général cet axe fera un certain angle  $\alpha$  avec la direction commune des deux barres. Il suffit de retourner le chariot de  $180^\circ$  pour voir dans la lunette l'image des réticules se déplacer de  $4\alpha$ . En ramenant par moitié l'image en coïncidence avec les réticules, et après quelques approximations successives en retournant plusieurs fois le chariot, on arrive à rendre  $\alpha$  très petit (quelques secondes) et on maintient la lunette dans cette position.

3° *Mesure de la température. Thermomètre à résistance de platine.* — L'emploi d'un thermomètre à mercure est tout à fait défavorable dans notre cas, à cause de son inertie thermique et de sa faible surface de contact avec le gaz. Nous verrons dans le chapitre IV, quand nous discuterons la précision des résultats, que la mesure de la longueur d'onde  $\lambda$  est elle-même extrêmement sensible à la variation de température. Notre thermomètre doit donc être rapide, sensible, stable et exact ; nous avons réalisé ces desiderata avec un thermomètre à résistance de platine. Le fil de platine est très fin ( $5/100^\circ$  de mm.) et très long (3 m.) ; il est enroulé en zigzag sur un cadre en mica de 10 cm. de côté et en contact direct avec le gaz, ce qui permet de mesurer rapidement la température moyenne de la zone intéressée par les ultra-sons.

La sensibilité est de 0,5 ohm par degré centigrade, il suffit donc que nous puissions mesurer sa résistance au centième d'ohm au pont de Wheastone pour apprécier le  $50^\circ$  de degré.

Le fil de platine est d'autre part inaltérable à la température ordinaire dans l'air et dans le gaz carbonique. Un enroulement du fil pas trop tendu sur le cadre et un recuit convenable après l'enroulement suffisent pour rendre le thermomètre stable.

**Etalonnage.** — On sait que la température normale  $\theta_n$  est liée à la température du thermomètre à résistance de platine  $\theta$  par l'équation de transformation parabolique (7) :

$$\theta_n = \left( \frac{0,5}{\delta} + 50 \right) + \sqrt{\left( \frac{0,5}{\delta} + 50 \right)^2 - \frac{\theta}{\delta}}.$$

Pour avoir la constante  $\delta$  de cette équation, il nous faut un troisième point de repère thermométrique, en plus des points fixes conventionnels 0 et 100°. La température qui nous intéresse est de l'ordre de 20° ; d'autre part, l'équation parabolique de transformation étant approximative ( $\delta$  varie suivant l'intervalle de température à mesurer), il est logique de prendre le troisième point entre 0 et 100°, nous avons essayé en particulier le point de fusion aqueuse du sulfate de sodium cristallisé avec 10 H<sub>2</sub>O, mais alors nous nous trouvons dans de mauvaises conditions pour l'étalonnage, les deux échelles — normale et de platine — étant peu différentes dans l'intervalle fondamental.

D'autre part, la pureté du fil de platine a son importance, on indique comme critérium  $R_{100}/R_0 \geq 1,39$  (8). Or, les fils de platine commerciaux sont en général impurs, surtout pour les petits diamètres à cause des difficultés d'étirage.

Finalement, nous avons trouvé plus simple d'adopter la méthode de comparaison avec un thermomètre étalon et cela grâce à l'amabilité du B. I. P. M. ; cette comparaison ne s'est pas faite sans difficultés à cause de la forme spéciale de

(7) *Recueil de constantes physiques* (S. F. P.), p. 12.

(8) *International Critical Tables*, vol. 1, p. 54.

notre thermomètre. La courbe d'étalonnage aux environs de 20° est d'ailleurs une droite.

**Causes d'erreur.** — La résistance totale du thermomètre est de l'ordre de 200 ohms, et comme nous avons seulement à mesurer la température ambiante, une compensation de la résistance des fils de connexion (gros câbles ayant en tout 0,1 ohm environ) n'est pas nécessaire.

L'échauffement produit par le courant de mesure qui donne une température en excès et qui trouble le régime thermique du milieu, est réduit autant que nous pouvions le faire en limitant le courant de mesure et la durée de celle-ci en abaissant d'abord la clef du galvanomètre.

#### § 6. — Précautions : humidité et température.

**Desséchage.** — Nous avons à opérer dans des gaz bien secs. La première opération consiste à bien dessécher l'enveloppe une fois pour toutes. Le réglage de l'appareil étant terminé (on aura soin d'enlever le réflecteur en verre), on met en place l'enveloppe pour procéder au desséchage de l'appareil qui dure plusieurs jours. On chauffe électriquement l'enveloppe en zinc pour la porter à une température de 105 à 110° tout en y faisant passer un courant très lent d'air comprimé, jusqu'à ce que l'air chaud sortant de l'appareil ne donne plus de condensation visible sur un objet froid. On dessèche alors préalablement l'air comprimé par du  $\text{CaCl}_2$  fondu et on réduit graduellement le chauffage à 80°, puis on supprime le chauffage et on dessèche plus énergiquement l'air comprimé par de l'anhydride phosphorique. On met alors rapidement en place le réflecteur et le thermomètre à résistance. Après ce desséchage à fond, il suffit pour le maintenir de placer dans l'enveloppe une coupelle contenant de l'anhydride phosphorique et d'y faire passer tous les matins un courant d'air sec ; ces précautions sont nécessaires : car l'ap-

pareil n'étant pas très étanche, la baisse de température nocturne produit un appel d'air extérieur.

On évitera autant que possible d'ouvrir l'enveloppe ; lorsque cette opération est devenue nécessaire, on laissera le moins de temps possible la tenture interne au contact de l'air extérieur. Si ce contact doit se prolonger au delà d'une heure, il est prudent de faire fonctionner le chauffage électrique ( $60-80^{\circ}$ ). En tout cas, une fois l'enveloppe remise en place, un courant d'air sec de plusieurs heures est de règle. L'air comprimé traverse d'abord une colonne remplie de KOH en pastilles, puis, de bas en haut, une seconde colonne contenant de l'anhydride phosphorique avec du coton de verre comme support ; enfin, avant de pénétrer dans l'enveloppe, cet air sec et privé de  $\text{CO}^2$  est filtré à travers un tampon de ouate pour arrêter les particules de  $\text{P}^2\text{O}^5$  qui pourraient être entraînées.

**Température.** — Bien que l'enveloppe soit calorifugée, dans l'intervalle d'une journée la température de l'enceinte peut encore varier notablement. Si l'on mesure pendant une journée à intervalles réguliers la température du gaz et si l'on traduit le résultat en courbe, on constate en général une augmentation de température le matin, un fléchissement au début de l'après-midi et vers 4 à 5 heures, un palier assez long dont on profitera justement pour faire une mesure de  $\lambda$ . La température commence à décroître à partir de 6 à 8 heures suivant les saisons. Notons que la présence de l'opérateur au voisinage de l'appareil peut provoquer une perturbation non négligeable. Il n'en est pas de même de la mise en marche de la source qui apporte une énergie très minime dans notre cas. Cependant, nous faisons fonctionner la source une heure avant la mesure afin que l'oscillateur ait pris un régime très stable. Pendant ce temps, l'opérateur est astreint à rester à sa position de mesure ; il s'occupera à repérer approximativement la position des maxima dont il aura

besoin et de s'assurer que le palier de température est atteint. Un peu avant cela, on fait fonctionner le ventilateur-agitateur pendant un quart d'heure pour bien brasser le gaz dans l'enveloppe, puis on attend un moment pour que l'air cesse de s'agiter. Le mode opératoire pour la mesure de  $\lambda$  est décrit dans le chapitre IV.

---

## CHAPITRE III

### Mesures de fréquences.

La mesure des fréquences couramment employées en radiotélégraphie peut être considérée comme un problème résolu : la précision de l'ordre du 100.000<sup>e</sup> que l'on obtient aujourd'hui dépasse largement notre besoin. La méthode qui nous a paru la meilleure pour notre cas, est celle de Bedeau et de Mare (9), méthode que nous avons adoptée avec de légères modifications de détail pour mieux l'adapter à notre cas spécial. Remarquons que malgré la grande stabilité d'un oscillateur à quartz, il nous a semblé préférable de mesurer sa fréquence au moment même de la mesure de la longueur d'onde de l'ultra-son, afin qu'elles se correspondent sûrement.

Enfin, nous rattachons à ce chapitre un paragraphe résumant les études faites sur l'oscillateur à quartz.

§ 7. — **Méthode de mesure.** — L'ensemble du dispositif employé est schématisé par la figure 7. L'organe fondamental est un diapason étalon dit « modulateur » (A). Il commande (module) une triode (B) dite « déformatrice » : son courant plaque est en effet déformé au point d'être crénelé, ce qui le rend extrêmement riche en harmoniques. On a intercalé dans son circuit plaque un circuit oscillant accordé sur l'harmonique que l'on veut renforcer et extraire. Si théoriquement le nombre des harmoniques peut être très

(9) F. BEDEAU et J. DE MARE. — T. S. F. Moderne. Août 1928, p. 469.

grand, on est pratiquement vite limité dans cette voie, par la diminution de leur amplitude et par leur resserrement, à mesure que leur rang monte. La pratique nous apprend qu'il est difficile d'aller bien au delà de la deux-centième ( $f=200\,000$ ). Le mode opératoire diffère donc un peu suivant que la fréquence à mesurer est inférieure ou

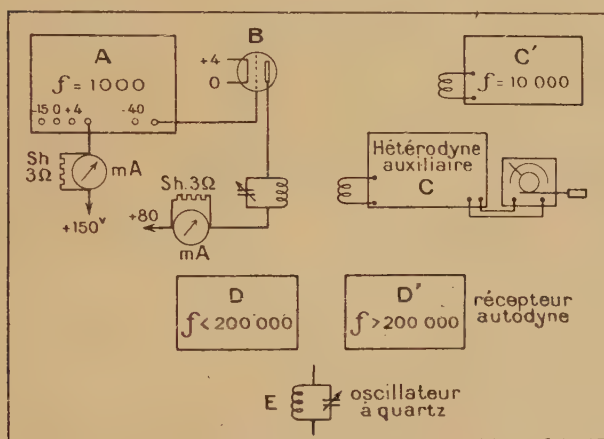


Fig. 7.

supérieure à  $200\,000$ . Dans ce dernier cas, un étage intermédiaire est nécessaire.

Nous avons figuré sur le schéma en (E), l'oscillateur à quartz dont on veut mesurer la fréquence. Il faut reconnaître que l'opération se trouve bien simplifiée par le fait que la fréquence d'un quartz se calcule assez exactement d'après la dimension intéressée, pour éviter tout tâtonnement inutile. Soit  $f'$  cette fréquence calculée que nous supposons d'abord inférieure à  $200\,000$ . Sans hésitation, on pourra la repérer sur un récepteur autodyne (D) par la méthode bien connue des « battements ». Il va sans dire qu'un tel repérage ne saurait être précis parce que l'étalon-

nage d'un récepteur est sujet à des variations et que la méthode des battements donne une erreur absolue de l'ordre d'une dizaine de périodes par seconde quelle que soit d'ailleurs la fréquence mesurée.

Il a donc été nécessaire de confier le repérage précis à une hétérodyne auxiliaire (C) stabilisée par condensateur shunté de grille, préalablement étalonnée et d'employer la méthode des « doubles battements » (10). Il consiste à recevoir en même temps dans le récepteur (D) en autodyne émettant une fréquence  $f_D$ , les deux émissions  $f_E$  et  $f_C$  réglées de façon à être très voisines, de l'oscillateur à quartz E et de l'hétérodyne C. Les trois fréquences  $f_D$ ,  $f_E$  et  $f_C$  vont battre deux à deux. Soit  $f_C - f_E = \varepsilon$ ,  $\varepsilon$  étant de quelques périodes par seconde et inaudible. Et soit  $f_D - f_C = f$  la note de battement entre  $f_D$  et  $f_C$ ; celle provenant du battement de  $f_D$  et  $f_E$  sera  $f_D - f_E = f + \varepsilon$ . Les deux notes de battement  $f$  et  $f + \varepsilon$  vont battre à leur tour pour donner une fréquence de modulation  $\varepsilon$  que l'on peut compter. En fin de compte, on entendra au récepteur D une note unique  $f$  affectée d'une fluctuation d'intensité de période  $\varepsilon$ . Cette fluctuation disparaîtra d'ailleurs, quand on aura réglé  $f_C$  exactement sur  $f_E$  car alors  $\varepsilon = 0$ , et on entendra au récepteur la note pure  $f$ . On aura donc ainsi reporté la fréquence  $f_E$  de l'oscillateur à quartz sur l'hétérodyne C et cela avec une précision aussi grande que l'on veut. Tout le problème des mesures de fréquences se ramène donc à l'étalonnage de l'hétérodyne C. Disons tout de suite que cet étalonnage ne peut pas être fait malheureusement une fois pour toutes, car malgré tout il se produit encore de légères modifications surtout avec le temps. On tourne la difficulté en modifiant un peu l'aspect du problème; on confie la stabilité au diapason étalon, l'hétérodyne C servira à repérer le rang des harmoniques et à inter-

(10) F. BEDEAU, — Onde électrique. Janvier 1927, p. 35.

poler entre deux harmoniques successives. Cette interpolation qui introduit une cause d'erreur supplémentaire, pourrait être faite avantageusement avec un pont à résonance ou un sonomètre quelconque. Nous avons préféré cependant la méthode à variation de capacité, grâce à un très bon condensateur-vernier, soigneusement étalonné par M. Bedeau pour sa thèse. Je rappelle que cette méthode, qui nous a donné une précision globale de l'ordre du 10 000<sup>e</sup>, est basée sur la formule de Thomson et en ne considérant que la variation de capacité entre deux fréquences très voisines.

Quant au repérage du rang des harmoniques, il est fait une fois pour toutes, car la stabilité est suffisante pour qu'il n'y ait aucune ambiguïté sur le rang des harmoniques repérées : le déplacement inévitable de la graduation restant circonscrit dans une zone dix fois plus faible que celle correspondant à l'intervalle de deux harmoniques successives. Nous avons mis d'ailleurs une hétérodyne C' (facultative) réglée à poste fixe sur 10 000 pps qui permet de vérifier rapidement par ses harmoniques l'étalonnage de l'hétérodyne C, vérification précieuse pour éliminer toute erreur matérielle d'inattention.

**Interpolation.** — La mesure d'une fréquence  $f_E$  ne dépassant pas 200 000 pps se conduira comme suit : après avoir reporté exactement cette fréquence sur l'hétérodyne C, comme nous l'avons vu plus haut, il reste seulement à déterminer, pour son interpolation, les positions des deux harmoniques du diapason qui l'encadrent. Cette opération se fait avec le récepteur D, accordé sur  $f_E$ , fonctionnant en détecteur à réaction (oscillations non amorcées). On fait alors agir les harmoniques du diapason, en accordant approximativement sur  $f_E$  le circuit oscillant de la lampe déformatrice. On entendrait au récepteur le son du diapason s'il était seul, car toutes les harmoniques sont modulées à 1 000 pps. Mais nous faisons agir en même temps l'hétérodyne C, réglée d'après

l'étalonnage préalable sur la position présumée de l'une des deux harmoniques intéressées. La fréquence qu'émettra l'hétérodyne sera extrêmement voisine de celle de l'harmonique dont on veut faire le point mais lui sera rarement égale, d'où il résulte un battement au récepteur. On parfait le réglage, ce battement devient inaudible, on n'entendra plus que le son du diapason avec des fluctuations d'intensité de plus en plus lentes pour être constante quand l'émission de l'hétérodyne C sera exactement confondue avec l'harmonique du diapason : on notera la position du condensateur-vernier. On obtient ainsi trois positions du condensateur-vernier correspondant à la fréquence  $f_E$  et aux deux harmoniques de rang  $k$  et  $k + 1$  encadrant  $f_E$ .

Soient  $C_1 < C_2 < C_3$  les capacités correspondant aux fréquences  $(k + 1)10^3 > f_E > k \cdot 10^3$ , on aura en appliquant la formule de Thomson :

$$T = 2\pi\sqrt{LC}$$

$$\frac{1}{k \cdot 10^3} = B\sqrt{C_3}, \text{ etc.}$$

ou :

$$C_3(k \cdot 10^3)^2 = C_2 f_E^2 = C_1 [(k + 1)10^3]^2 = C^{\text{te}}.$$

Posons :

$$C_2 = C_1 + \alpha, C_3 = C_1 + \beta, \text{ et } f_E = (k + \varepsilon)10^3 \text{ avec } 0 < \varepsilon < 1.$$

Il vient :

$$(C_1 + \beta)k^2 = (C_1 + \alpha)(k + \varepsilon)^2 = C_1(k + 1)^2$$

(3)
(2)
(1)

L'opération de l'interpolation consiste à déterminer  $\varepsilon$  ;  $\alpha$  et  $\beta$  sont donnés par la courbe d'étalonnage du condensateur étalon servant de vernier et par les trois points déterminés.

On tire de l'équation (1) = (2) :

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{C_1}{C_1 + \alpha}}(k + 1) - k$$

$C_1$  étant donné par l'équation (1) = (3) :

$$C_1 = \frac{\beta k^2}{2k + 1}.$$

Lorsque la fréquence  $f_E$  dépasse de beaucoup 200 000 pps on ne peut plus la reporter directement sur l'hétérodyne C, mais on y reportera des sous-multiples. Pour cela, nous avons figuré en D' (fig. 7), un récepteur autodyne réglé approximativement sur  $f_E$ , sur lequel on fait agir l'émission de l'oscillateur à quartz et une harmonique de l'hétérodyne C qui soit égale à  $f_E$ . Avec l'harmonique 5 (de 200 000) on arrive ainsi à  $f_E = 10^6$ . Connaissant l'ordre de grandeur de la fréquence du quartz, la détermination du rang de l'harmonique de l'hétérodyne C ne présente aucune ambiguïté. Le reste de l'opération est le même que pour le cas précédent.

Au point de vue de l'erreur introduite par l'interpolation dans la méthode adoptée, elle dépend essentiellement de la stabilité de fonctionnement de l'hétérodyne C, de la perfection du condensateur-vernier et de l'équation personnelle de l'opérateur. Il est toujours prudent de ne commencer une mesure qu'après avoir laissé fonctionner pendant un certain temps tous les appareils, afin qu'un régime permanent soit sensiblement réalisé ; de ramener toujours l'interpolation sur la partie bien rectiligne de la courbe d'étalonnage du condensateur-vernier et de choisir l'harmonique de l'hétérodyne C qui donne la valeur numérique de  $\varepsilon$  aussi petite que possible. A ce point de vue, la remarque très importante faite par Bedeau et de Mare est à signaler : à savoir que l'on peut étalonner l'hétérodyne C de 500 à 500 pps. en partant d'un diapason de 1 000, ce qui rétrécit l'intervalle d'interpolation de moitié. Nous avons constaté dans certains cas favorables que l'erreur introduite est de quelques cent-millièmes seulement.

§ 8. — **Oscillateur à quartz.** — Je rappelle que le phénomène piézoélectrique fut découvert par les frères J. et P. Curie en 1880 (11) et que la réciprocité du phénomène fut prévue peu après par Lippmann (12). Langevin (13) en appliquant la résonance électromécanique a pu amplifier considérablement le phénomène, ce qui a ouvert la voie à de nombreuses applications importantes. Les quartz piézo-électriques que nous avons employés jusqu'ici sont taillés

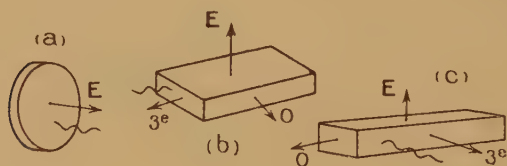


Fig. 8.

conformément aux indications de Curie. Au point de vue formes, nous employons des disques quand les ondes ultrasonores doivent être émises par une face électrique (courtes longueurs d'onde) (fig. 8 a), et des lames prismatiques dans le cas où les ondes sont émises par une face normale à la 3<sup>e</sup> direction (grandes longueurs d'onde). Aucun des résultats donnés dans le chapitre suivant n'a été obtenu avec des vibrations suivant l'axe optique quoique *a priori* rien n'empêche de le faire. Je signalerai en passant que j'ai observé des réactions suivant le 3<sup>e</sup> axe pendant que le quartz vibrait suivant la fondamentale correspondant à l'axe électrique E (fig. 8 c). Nous avons pu ainsi, sans toucher au quartz et en modifiant seulement les constantes électriques du circuit

(11) CURIE. — *Comptes Rendus*, t. 91 (1880), pp. 294 et 383; t. 92 (1881), pp. 186 et 350; t. 93 (1881), p. 1137; t. 95 (1882), p. 914.

(12) LIPPMANN. — *Comptes rendus*, t. 92 (1881), pp. 1049 et 1149.

(13) LANGEVIN. — *Journ. de Phys.*, 6<sup>e</sup> série, t. 4 (1923), p. 537; *Recherches et Inventions*, n<sup>o</sup> 113 (1924), p. 441; n<sup>o</sup> 132 (1926), p. 119.

antirésonant de l'oscillateur, faire émettre successivement par la même face du quartz des ondes ultra-sonores de deux fréquences différentes. Mais nous avons trouvé pour celle correspondant à l'axe électrique une vitesse beaucoup plus élevée, — que nous n'avons pas retenue parce qu'elle n'est pas obtenue dans les mêmes conditions de vibrations du quartz que les autres. Nous avons fait cet essai en vue de tenter une soudure plus commode entre les deux formes de quartz, prismatique et disque, dans la zone de fréquences 250 à 500 kC, c'est-à-dire pour des épaisseurs de quartz de 12 à 6 mm. Au point de vue épaisseur, les quartz prismatiques sont groupés en deux catégories : les uns minces (5 à 6 mm. d'épaisseur) et les autres épais (15 mm. en moyenne) que nous avons considérés comme les mieux taillés.

La monture du quartz a une grande importance pratique, mais nous n'entrerons pas dans de trop longs détails à ce sujet, nous dirons seulement que nous sommes arrivés à une grande stabilité de fonctionnement. Il en est de même pour le contrôle de l'homogénéité et le repérage des axes du quartz. Cette partie de notre travail, importante pour notre cas, constitue un sujet à part que nous avons publié dans la *Revue d'Optique* (14). Nous insistons sur ce point qu'il est extrêmement difficile d'avoir des échantillons presque purs de grandes dimensions et d'autre part, que la taille rigoureuse suivant les axes est chose délicate. Nous signalerons enfin qu'en vue de l'autocollimation les faces émettrices des quartz sont optiquement bonnes : une frange sur la majeure partie de l'étendue, tandis que la face opposée est simplement polie.

Le schéma électrique de l'oscillateur à quartz dérive directement de l'un de ceux indiqués par Pierce (fig. 9). Le quartz est intercalé entre la grille et le filament. Le circuit plaque contient un circuit antirésonant accordé sur une fréquence

(14) *Revue d'optique*, t. 10 (1931), pp. 153 à 161.



dique et de chauffage. Elle est très peu variable suivant le type de triode employée ; la position du quartz dans sa monture ; l'accord du circuit antirésonant et naturellement aussi suivant la température. Mais nous n'avons plus à tenir compte de tout cela du moment que nous mesurons la fréquence avant et après la mesure de longueur d'onde des ultra-sons.

Je ne m'étendrai pas sur la théorie des oscillateurs à quartz ni sur le peu de connaissances que nous possédons sur les vibrations du quartz. Mais j'indiquerai que pour éliminer des anomalies possibles, nous faisons subir aux quartz une fois montés dans l'oscillateur l'essai en règle suivant. Nous traçons pour chaque quartz sa courbe caractéristique : variation du courant plaque en fonction de la capacité de l'accord du circuit antirésonant plaque :  $I_p = f(C_p)$  en même temps que la variation de fréquence  $\Delta f = \varphi(C_p)$  (fig. 10). Quand il se présente des anomalies, on voit des « sauts de moutons ». Nous avons constaté d'autre part que la sensibilité ( $\Delta I_p / \Delta l$ ) du quartz aux ondes réfléchies par le réflecteur, que l'on déplace pour la mesure de  $\lambda$ , dépend beaucoup de la valeur de la capacité  $C_p$  choisie. Au voisinage de la pointe B', le quartz est très peu sensible à la réaction des ondes réfléchies. Au contraire, la branche AA' donne une sensibilité très rapidement croissante de A' en A. Près du point A, l'oscillateur se décroche par la réaction, même quand le réflecteur est très loin du quartz, et il ne s'amorce que lentement quand la phase est redevenue favorable aux oscillations du quartz. Il y a donc un juste milieu à choisir. Même en A', où la sensibilité est maxima, le fonctionnement n'est pas stable ; un maximum de sensibilité ne donne pas toujours un meilleur repérage du « pic ».

---

## CHAPITRE IV

### Résultats et discussions.

§ 9. — **Mode opératoire.** — Pour un quartz donné, la mesure de la vitesse de propagation de l'ultra-son produit nécessite, en principe, une journée entière ; matin : mesure de la fréquence ; après-midi : mesure de la longueur d'onde.

**Montage du quartz.** — On commence par mettre en place le quartz dans la monture commune à tous les quartz d'une même catégorie, la face travaillée optiquement vers l'extérieur (réflecteur) affleurant un repère marqué sur la monture. On fixe alors la monture sur le support du quartz que l'on enfonce dans le tube fixe de l'interféromètre. La précision mécanique de toutes ces pièces doit être telle que l'on doit voir immédiatement dans la lunette autocollimatrice l'image des réticules réfléchi par la face émettrice du quartz, soit une précision angulaire de  $\pm 2^\circ$  ; sans cela l'opération d'autocollimation serait très longue. Une fois les images perçues dans la lunette, il est aisé de les ramener en coïncidence avec les réticules en agissant convenablement sur les trois vis de réglage du support du quartz. L'interféromètre est alors prêt à fonctionner ; on y établit une circulation d'air sec (privé de  $\text{CO}_2$ ), pendant un temps plus ou moins long suivant le débit.

**Réglage préalable des hétérodynes.** — On repère la fréquence de l'oscillateur à quartz successivement sur le récepteur autodyne « D » et sur l'hétérodyne auxiliaire « C »

(voir chapitre III). Enfin, on fait fonctionner le diapason et on repère sur l'hétérodyne « C » les harmoniques qui encadrent la fréquence (ou un sous-harmonique) du quartz. Tous les appareils sont dès lors approximativement réglés.

**Choix de la capacité  $C_p$  de l'oscillateur.** — On fait choix ensuite de la valeur la plus convenable à donner à la capacité  $C_p$  du circuit antirésonant de l'oscillateur à quartz d'après l'allure de la courbe donnant la déviation  $\theta$  du galvanomètre en fonction de  $C_p$  et en tenant compte des considérations de stabilité et de sensibilité que nous avons exposées au § 8 (fig. 10).

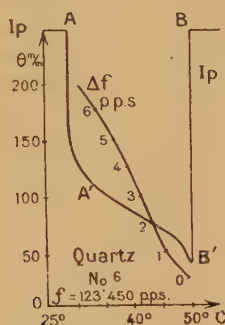


Fig. 10.

**Choix des positions extrêmes à donner au réflecteur.** — Nous avons observé dès le début de nos expériences une zone perturbée près du quartz ; il convient donc de donner au réflecteur une position initiale, suffisamment éloignée du quartz, à partir de laquelle on doit commencer la mesure de la longueur d'onde des ultra-sons ; position à déterminer d'après une exploration préalable. D'autre part, il faut que l'intervalle compris entre les deux positions extrêmes du réflecteur soit suffisamment grand pour que l'erreur relative commise sur sa mesure tombe au-dessous d'une certaine limite  $1/10\,000^e$  par exemple.

**Exploration préalable.** — On compense le courant plaque de l'oscillateur et on donne au galvanomètre une sensibilité adaptée à chaque cas particulier d'expérience pour que la valeur maxima du courant plaque (variation) couvre approximativement la totalité de l'échelle. On fait une exploration préliminaire en partant de la zone troublée pour avoir une idée sur la décroissance des « bosses » ou « maxima secondaires » pour entrer dans la zone de mesure afin de contrôler la régularité des espacements des « pics » en relevant à intervalles réguliers leurs positions.

Pour être acceptable, la zone de mesure doit :

1° être au delà de l'inversion des « bosses » et des « pics » (voir discussion) caractérisant la zone troublée ;

2° avoir au moins une longueur de 10 à 25 cm. suivant les fréquences, intervalle dans lequel on prendra la longueur moyenne  $\lambda_m$  ;

3° avoir une régularité suffisante des espacements des pics pour que l'écart maximum du  $\lambda_m$  dans le premier dixième de l'intervalle sur le  $\lambda_m$  dans l'intervalle entier ne dépasse pas un millièrne.

**Mesure de la vitesse.** — Ceci étant, on brasse le gaz dans l'interféromètre en faisant fonctionner l'agitateur et il ne reste plus qu'à attendre le début du palier de température pour prendre la mesure définitive. Quand la température devient suffisamment stable, on arrête l'agitateur, et on procède au repérage préalable des positions des pics à intervalles assez serrés. La mesure définitive de  $\lambda$  doit être aussi rapide que possible. On commence par mesurer une première fois la fréquence du quartz puis la température. On détermine alors très rapidement les positions d'un certain nombre de pics dont on connaît maintenant le rang : 2 ou 3 dans l'intervalle de mesure en commençant d'abord par la position la plus éloignée du réflecteur. Lorsque celui-ci est arrivé à sa position la plus proche du quartz, on mesure à nouveau la

température puis on refait la série de mesures en sens inverse et on note une dernière fois la température quand on arrive au bout. Immédiatement après cela, on mesure une seconde fois la fréquence du quartz.

En général, « durant » un palier de température, la position du pic le plus éloigné est très peu déplacée, on interpolera sa position exacte d'après la température correspondant à la position du réflecteur la plus rapprochée du quartz. On arrive ainsi à éliminer entièrement l'influence d'une très légère variation de température.

**Résultats** — Les résultats des expériences sont réunis dans la table (1) et représentés par le graphique (fig. 11). Les

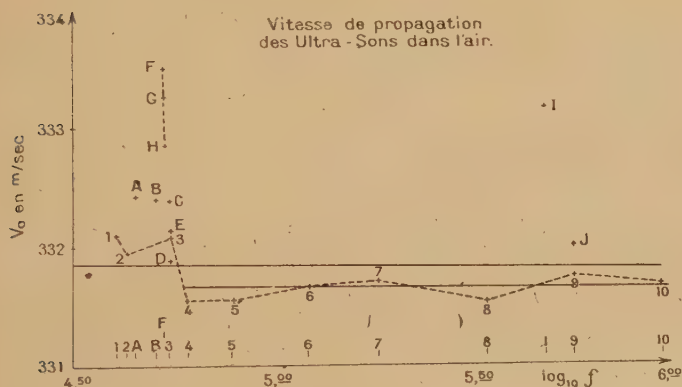


Fig. 11.

points marqués par les chiffres 1 à 10 sont ceux que nous avons relevés pour mesurer la vitesse de propagation, tandis que ceux marqués avec des lettres (A à J) sont ceux que nous avons obtenus au cours des essais préliminaires.

Je donnerai ici à titre d'exemple, les détails de calculs pour un quartz seulement : le n° 3. Les points C, D, E lui correspondent également ; ces points nous serviront dans la

suite pour élucider la manière dont agit la température sur le résultat d'une mesure et aussi pour justifier la règle que

TABLEAU I. — *Vitesse de propagation des ultra-sons dans l'air sec et privé de CO<sub>2</sub>, à 0° C.*

| N°<br>du<br>quartz | Axe<br>utilisé | Surface<br>émettrice<br>S<br>cm <sup>2</sup> | Fré-<br>quences<br>f<br>pps. | Lon-<br>gueur<br>d'onde<br>$\lambda$<br>mm. | Tempé-<br>rature<br>t<br>C | Vitesse<br>V <sub>0</sub><br>m./sec. |
|--------------------|----------------|----------------------------------------------|------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| 1                  | 3°             | $1,5 \times 3,0 = 4,5$                       | 40,888                       | 8,371                                       | 17°,05                     | 332,10                               |
| 2                  | 3°             | $1,0 \times 2,15 = 2,15$                     | 43,060                       | 7,924                                       | 15°,43                     | 331,95                               |
| 3                  | 3°             | $1,65 \times 3,75 = 6,20$                    | 55,665                       | 6,152                                       | 17°,26                     | 332,10                               |
| 4                  | 3°             | $0,5 \times 3,0 = 1,50$                      | 63,288                       | 5,424                                       | 19°,67                     | 331,55                               |
| 5                  | 3°             | $0,5 \times 3,0 = 1,50$                      | 80,130                       | 4,296                                       | 21°,24                     | 331,60                               |
| 6                  | 3°             | $0,6 \times 3,75 = 2,25$                     | 123,453                      | 2,7826                                      | 19°,82                     | 331,70                               |
| 7                  | 3°             | $0,55 \times 2,35 = 1,30$                    | 186,682                      | 1,846                                       | 21°,60                     | 331,73                               |
| 8                  | 3°             | $0,6 \times 5,6 = 3,35$                      | 348,590                      | 0,9806                                      | 17°,18                     | 331,53                               |
| 9                  | E              | $\frac{\pi}{4} (1,0)^2 = 0,8$                | 578,630                      | 0,59547                                     | 21°,43                     | 331,73                               |
| 10                 | E              | $\frac{\pi}{4} (0,8)^2 = 0,5$                | 972,130                      | 0,3504                                      | 14°,93                     | 331,70                               |

nous venons de voir pour l'élimination de la variation de température.

**Exemple : Quartz n° 3.**

**Fréquence.** — La fréquence n'a pas varié d'une façon sensible au cours des mesures de longueur d'onde.

TABLEAU II. — *Exemple de mesure de fréquence*  
(Quartz n° 3).

| f<br>en kC | C      |
|------------|--------|
| 55         | 89°,70 |
| 55,5       | 85°,80 |
| q          | 84°,55 |
| 56         | 82°,00 |
| 56,5       | 78°,90 |

Le condensateur-vernier de l'hétérodyne « C » indique pour les fréquences données dans la colonne *f* (table II) les valeurs de la colonne C en degrés. La courbe d'étalonnage du condensateur présentant justement dans ce parage une partie rectiligne, il y a proportionnalité entre la variation de capacité et celle des indications en degrés. D'autre part, les rangs des harmoniques sont suffisamment élevés pour rendre l'emploi de la formule de Thomson inutile ; on voit en effet que pour une variation de 500 pps., le condensateur-vernier tourne de 3°9, 3°8 et 3°8 pour passer de 55 à 55,5 ; de 55,5 à 56 et de 56 à 56,5 kC. Il suffit, par conséquent, d'interpoler par simple règle de trois et je trouve :

$$f_q = 55,500 + \frac{500 \times 1,25}{3,8} = 55,665 \pm 5$$

**Longueur d'onde.** — Exemple d'interpolation.

La mesure III (table V) a été faite de façon à se conformer aux limites de température de la mesure II (table IV). L'écart de positions du pic de rang « 62 » (rang arbitraire)

TABLEAU III. — *Mesure de longueur d'onde.*  
*Essai préliminaire (I).*  
*Le réflecteur s'éloignant de la source.*

| Rangs<br>des pics (origine<br>arbitraire) | Positions<br>des pics<br>(origine<br>arbitraire) | Ecartement<br>(5 pics) | Température                           |
|-------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| 0                                         | 85,540                                           | 15,370                 | R = 1982,7                            |
| 5                                         | 100,910                                          | 15,380                 | } température<br>moyenne<br>t = 16°33 |
| 10                                        | 116,290                                          | 15,365                 |                                       |
| 15                                        | 131,655                                          | 15,365                 |                                       |
| 20                                        | 147,020                                          | 15,355                 |                                       |
| 25                                        | 162,375                                          | 15,375                 |                                       |
| 30                                        | 177,750                                          | 15,375                 |                                       |
| 35                                        | 193,125                                          | 15,365                 |                                       |
| 40                                        | 208,490                                          | 15,370                 |                                       |
| 45                                        | 223,860                                          | 15,365                 |                                       |
| 50                                        | 239,225                                          | 15,375                 |                                       |
| 55                                        | 254,600                                          |                        |                                       |
| λm = 6,1476 par excès.                    |                                                  |                        |                                       |

TABLEAU IV. — *Mesure de longueur d'onde,*  
*essai préliminaire (II).*  
*Le réflecteur s'approchant de la source.*

| Rang<br>des pics (origine<br>arbitraire) | Positions<br>des pics<br>(origine<br>arbitraire) | Ecartement<br>(10 pics) | Température                            |
|------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------------------|
| 0                                        | 194,725                                          |                         | R = 1989,2                             |
| 10                                       | 164,020                                          | 30,705                  |                                        |
| 20                                       | 133,310                                          | 30,710                  | } température<br>moyenne<br>t = 17°,26 |
| 30                                       | 102,565                                          | 30,745                  |                                        |
| 40                                       | 71,830                                           | 30,735                  |                                        |
| 50                                       | 41,050                                           | 30,780                  |                                        |
| 60                                       | 10,275                                           | 30,775                  | R = 1989,9                             |
| 70                                       | 39,545 — 60                                      | 30,730                  |                                        |
| $\lambda_m = 6,148.$                     |                                                  |                         |                                        |

est de  $197,8 - 197,745 = 0,055$  mm. pour un écart de température correspondant à  $\Delta R = 0,7$  °. En admettant la pro-

TABLEAU V. — *Mesure de longueur d'onde (III).*  
*Le réflecteur faisant un aller et retour.*

| Rang des pics | Position des pics | Température |
|---------------|-------------------|-------------|
| 62            | 197,800           | R = 1989,9  |
| 0             | 7,055             | 1989,6      |
| 62            | 197,745           | 1989,2      |

portionnalité, la position du pic « 62 » à la température du pic « 0 » c'est-à-dire  $R = 1989,6$  ( $17^{\circ}26$ ), sera :

$$197,8 - \frac{0,055 \times 0,3}{0,7} = 197,765$$

d'où :

$$\lambda_m = \frac{197,765 - 7,055}{31} = 6,152$$

Vitesse de propagation. — Elle est indiquée par la table VI.

TABLEAU VI. — *Vitesse de propagation.*

| Point<br>sur<br>fig. II | Mesures<br>N° | Fréquence | $\lambda_m$ | Température | $V_0$  |
|-------------------------|---------------|-----------|-------------|-------------|--------|
| C                       | I             | 55 665    | 6,1476      | 16°, 33     | 332,40 |
| D                       | II            | »         | 6,148       | 17°, 26     | 331,90 |
| E                       | moy. I, II    | »         | »           | »           | 332,15 |
| 3                       | III           | »         | 6,152       | 17°, 26     | 332,10 |

## § 10. — Discussion.

**Précision des instruments de base.** — La méthode que nous avons employée est basée sur la formule fondamentale :

$$V = \lambda.f.$$

Du fait que les ondes ultra-sonores se propagent dans un milieu élastique, il faut encore tenir compte de la nature du milieu et de sa température. Pour un milieu expérimenté donné, les facteurs intéressant la vitesse sont donc au nombre de trois : la longueur, la fréquence et la température. Les instruments de précision de base que nous avons employés sont : 1° un double-décimètre gradué au  $1/10^6$  de mm. ; 2° un diapason en élinvar de 1 000 pps. à entretien par pentode ; 3° un thermomètre à résistance de platine comparé au voisinage de  $20^{\circ}$  C. Tous ces instruments ont été étalonnés avant les mesures définitives. Nous ne décrirons pas ici ces étalonnages mais nous dirons seulement que les précisions obtenues sont de  $1/100\,000^{\circ}$  pour la longueur ;  $1/100\,000^{\circ}$  pour la fréquence et  $1/50^{\circ}$  de degré C (échelle H) pour la température.

**Erreurs de lecture.** — L'erreur de lecture sur la règle est de  $1\ \mu$ . L'erreur d'interpolation des fréquences de l'oscillateur à quartz peut être rendue égale ou inférieure à  $1/10\,000^{\circ}$  ; l'erreur de lecture sur le condensateur-vernier étant toujours de  $0^{\circ}05$ , il est possible de choisir convenablement la self de l'hétérodyne « C » pour qu'une variation de 500 pps. sur la fréquence donne une variation de capacité correspondant à la valeur requise pour la précision de  $1/10\,000^{\circ}$  (par exemple  $\Delta C = 5^{\circ}$  pour  $f = 50\,000$ ).

Pour le thermomètre, l'erreur de lecture est égale à  $1/50^{\circ}$  de degré (dépend de la sensibilité du pont).

Si nous ne tenons compte que des erreurs résultant des lectures des instruments de base, nous obtiendrons très

facilement une erreur relative globale de  $1/3\,000^\circ$ . Il suffirait de tolérer à chacune des lectures une erreur relative de  $1/10\,000^\circ$  par exemple. Nous avons vu que ceci est réalisé pour la fréquence ; pour la longueur, il suffirait de prendre un intervalle de 1 cm. Quant à la température, pour avoir la même erreur relative, il suffisait que l'on eût  $\frac{1}{2}\alpha\Delta t < 1/10\,000^\circ$  ou  $\Delta t < 1/20^\circ\text{C}$ . Il ressort de là que nous aurions pu pousser la précision globale jusqu'au  $1/10\,000^\circ$  sans trop de difficultés supplémentaires si nous ne tenions compte que des erreurs de lectures. Prenons par exemple, pour la longueur un intervalle de 5 cm., son erreur relative deviendrait égale à  $1/50\,000^\circ$  ; une variation  $\Delta C/\Delta f$  trois fois plus grande ( $\Delta C = 15^\circ$  pour  $\Delta f = 500$  à partir de  $f = 50\,000$ ) pour que l'erreur sur la mesure de fréquence tombe à  $1/30\,000^\circ$ . Et une erreur de  $\Delta t = 1/50^\circ$  de degré pour que l'erreur relative de ce chef devienne  $1/25\,000^\circ$ . L'erreur totale :  $1/50\,000^\circ + 1/30\,000^\circ + 1/25\,000^\circ$  est alors inférieure à  $1/10\,000^\circ$ .

Mais malheureusement, nous n'avons pas que des erreurs de lectures, surtout pour les mesures de  $\lambda$ . En fin de compte, nous sommes obligés de nous en tenir au  $1/3\,000^\circ$ . Et même, étant donnée la complexité du phénomène, simple en apparence, nous avons jugé prudent de ne compter que sur une précision de  $1/1\,000^\circ$  seulement pour l'ensemble de l'étendue de nos expériences. Nous allons chercher à donner un aperçu sur les différentes causes d'erreur.

### Différentes causes d'erreurs expérimentales.

**Fréquence.** — Disons tout de suite que la fréquence est hors de cause, si nous nous en tenons au  $1/10\,000^\circ$ . Le coefficient de température du diapason en élinvar est extrêmement faible (de l'ordre de  $6.10^{-6}$  pps./degré C) dans les limites de variations de température habituelles, nous pouvons ne pas en tenir compte. Cependant l'amplitude de vibration

peut donner une autre cause d'erreur, petite également, mais pour être plus tranquille nous avons maintenu les tensions d'alimentation aux mêmes valeurs que pendant l'étalonnage. De plus, deux milliampèremètres nous servent d'indicateurs : l'un intercalé dans le circuit plaque de la pentode d'entretien et l'autre dans celui de la lampe déformatrice. D'autres causes d'erreur encore à signaler sont les effets de capacité et de couplage entre différents postes. Ces effets s'éliminent automatiquement puisque chaque fois nous nous référons finalement au diapason étalon. Il suffit donc de veiller à ce que durant une mesure, aucun de ces effets ne varie.

**Température.** — La température peut intervenir sur la longueur d'onde de deux façons : statiquement par le terme  $\sqrt{1 + \alpha t}$  que nous avons vu plus haut et dynamiquement (c'est-à-dire erreur due à la variation de température). A vrai dire, elle agit aussi sur la fréquence du quartz, mais comme nous la mesurons toujours avant et après la mesure de  $\lambda$ , il est inutile de l'explicitier. Nous parlerons ici uniquement de l'effet sur la longueur d'onde  $\lambda$  dû à la variation de température. Supposons pour simplifier que cette variation soit linéaire dans un laps de temps relativement court. Pour mesurer  $\lambda$ , nous avons besoin de prendre les positions de deux pics  $P_1$  et  $P_2$  entre lesquelles nous prenons une moyenne. Soit  $t_1$  la température du milieu au moment où nous déterminons la position  $x_1$  de  $P_1$ , à cette température la position du pic extrême  $P_2$  est en  $x_2$ . Mais nous ne pouvons pas faire les deux mesures à la fois, il s'écoule un certain temps entre les deux mesures et une certaine variation de température s'ensuivra. Soit  $t_2$  ( $t_2 > t_1$  je suppose) la température au moment où nous mesurons la position  $x_2$  de  $P_2$ ; la température  $t_2$  étant supposée plus grande que celle  $t_1$  la colonne d'ondes stationnaires s'est dilatée, et nous avons les nouvelles positions  $x'_1$  et  $x'_2$  des pics  $P_1$  et  $P_2$ . Le résultat

de notre mesure est l'écartement  $x_1 - x'_2$  qui ne correspond ni à  $t_1$  ni à  $t_2$  ni à leur moyenne. Nous voyons d'autre part qu'il est en excès sur l'écartement  $x'_1 - x'_2$  correspondant à la température la plus élevée (fig. 12). Si nous avions pris la position de  $P_2$  le premier, dans les mêmes conditions, nous aurions eu l'écartement  $x_2 - x'_1$  qui est en défaut sur celui de  $x_2 - x_1$  correspondant à la température la plus basse. Bien entendu, une diminution de température produirait un effet en sens inverse. Cet effet de

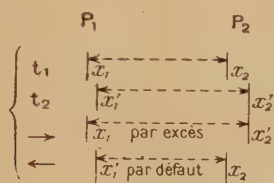


Fig. 12.

variation de température est d'autant plus sensible, toutes choses égales d'ailleurs, que les rangs des pics sont plus élevés (c'est-à-dire sont plus éloignés de la source) et que leur écartement  $x_1 - x_2$  est plus faible. En effet, soit  $P_1$  de rang 500, c'est-à-dire qu'il y a  $500 \lambda/2$  entre la source et  $P_1$ , et soit  $P_2$  de rang 501, c'est-à-dire  $x_1 - x_2 = \lambda/2$ , si entre les deux mesures, la température a varié de telle façon que  $\lambda/2$  augmente de  $1/10\,000^\circ$  ( $1/20^\circ$  environ) ; l'augmentation sur les  $500 \cdot \lambda/2$  sera 500 fois cette quantité, c'est-à-dire  $1/20 \cdot \lambda/2$  et l'erreur relative commise sur la mesure de  $x_1 - x_2$  sera de 5 0/0. Il apparaît donc un effet d'amplification considérable. On voit ainsi que l'interféromètre dans ces conditions constitue un instrument extrêmement sensible à la variation de température. Par là même, on trouve facilement une justification de la règle que nous avons établie pour éliminer de petites variations de température (§ 9).

Un autre point digne d'attention est le manque d'homogé-

néité thermique dans l'enceinte. Un agitateur nous semble indispensable de même qu'une enveloppe calorifuge pour la boîte contenant le gaz. Autrement, on trouverait soit des espacements de  $\lambda$  très irréguliers soit une variation systématique aux deux extrémités : près du quartz et près du fond de la boîte. Je rappelle en passant que le terme de correction  $\sqrt{1 + \alpha t}$  est établi dans l'échelle de température thermodynamique ; on commettrait une erreur non négligeable du fait d'employer sans correction l'échelle du thermomètre à mercure qui, au voisinage de 20 à 30° est en avance de 0°1 (erreur sur  $\lambda = 1/5\ 000^\circ$ ). Nous faisons remarquer d'autre part que la constante  $\alpha$  n'est pas exactement connue ; par suite si l'on y recourt, on introduit une erreur non négligeable quand on cherche le 1/10 000° (qui nous semble problématique). Le moyen radical pour éliminer toutes les causes d'erreur provenant de la température, c'est de ramener effectivement la température du gaz à zéro degré centigrade en plongeant la boîte de l'interféromètre dans de la neige en fusion.

### Causes d'erreur sur la longueur d'onde.

**Manque de précision au voisinage d'un maximum.** — On ne saurait chercher à tracer complètement le pic ce qui se ferait au détriment de la stabilité de la température. Le moyen qui nous a semblé le meilleur pour déterminer la position d'un pic c'est de procéder par interpolation par cinq points. Deux points seraient suffisants si l'on était sûr que la forme des pics fût très régulière, c'est-à-dire sans la moindre trace de « bosses ». A ce point de vue, il est essentiel d'adopter une sensibilité convenable ; car une sensibilité excessive (interpolation inutile), comme une sensibilité insuffisante, ne donne pas de bons résultats pour l'interpolation. Il est évident que ce sont les grandes longueurs d'onde qui ont le plus besoin d'interpolations puis-

que l'erreur de lecture en fraction de  $\lambda$  reste constante. Dans les cas les plus défavorables, on arrive encore à des précisions d'interpolation de  $\pm 5 \mu$ .

**La sensibilité.** — Nous entendons par sensibilité la variation du courant plaque  $I_M - I_m$ . Cette sensibilité dépend de

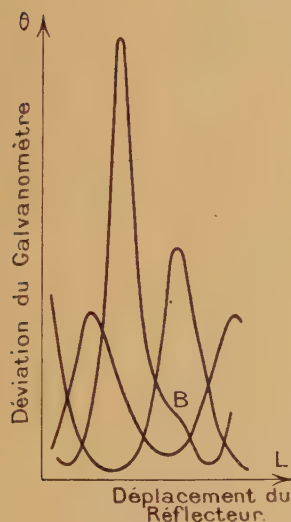


Fig. 13.

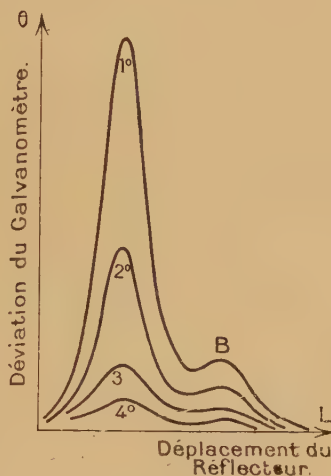


Fig. 14.

la distance du réflecteur à la source (fig. 2). Pour une position du réflecteur donnée, cette sensibilité dépend de l'accord du circuit antirésonant de plaque (en général, du couplage grille plaque). Des graphiques illustrent mieux que tout commentaire. La figure 13 indique la variation de sensibilité en fonction de la distance du réflecteur ; la figure 14, la même variation en fonction de  $C_p$  (capacité d'accord du circuit plaque) pour une distance  $D$  donnée du réflecteur. Sur ces figures, on voit des bosses en « B ». Pour étudier l'influence de «  $C_p$  » sur l'importance des bosses, nous

avons tracé la figure 15 en prenant  $I_M$  dans chaque cas comme égal à 100 o/o, on voit que les bosses peuvent être de 19 à 40 o/o de  $I_M$ .

Il semble, dans ces conditions, qu'il y ait avantage à prendre «  $C_p$  » donnant la sensibilité maxima. Cependant, il y a un juste milieu à tenir. En effet, à proprement parler, il n'y a pas de maximum de sensibilité, car alors l'oscillateur se décroche par une réaction défavorable (fig. 16, courbe 4, partie pointillée). Même le cas de la courbe 3, qui

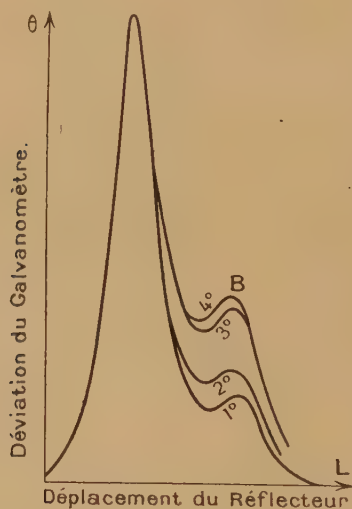


Fig. 15.

a une pointe aiguë séduisante, n'est pas à conseiller, car il faut attendre longtemps (plusieurs minutes) pour que le régime permanent soit atteint (pas assez entretenu). Et si l'on traçait cette courbe trop hâtivement, on aplatirait la pointe en même temps que l'on déterminerait un effet d'entraînement du pic dans un sens ou dans l'autre suivant celui du déplacement du réflecteur. On voit donc

qu'une grande sensibilité ne donne pas forcément un meilleur repérage de la position d'un pic, une bonne courbe est celle qui présente un pic bien pointu et stable. Mais bien entendu, cette pointe finit toujours par s'émousser pour

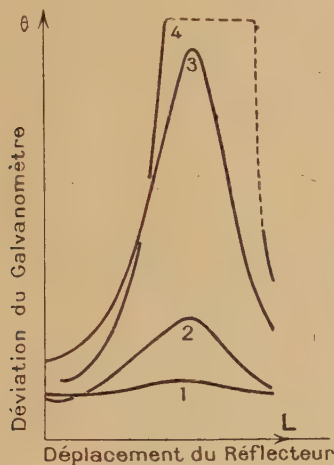


Fig. 16.

devenir sinusoïdale à mesure que le réflecteur s'éloigne de la source.

**Région troublée près du quartz.** — La plus grande difficulté pour une mesure précise de la longueur d'onde  $\lambda$ , réside dans ce fait qu'il y a une région que nous avons appelée troublée près du quartz. On sait peu de choses sur cette région troublée ; dans le cas des ondes émises suivant la troisième direction, on peut affirmer que :

1° Quand on rapproche le réflecteur suffisamment près du quartz, on arrive toujours à faire décrocher l'oscillateur.

2° A partir de ce moment, quand on éloigne le réflecteur, on constate toujours la présence de bosses accompagnant les pics.

3° Il y a toujours une inversion des bosses et des pics.  
 Tout ceci est mis en évidence sur la figure 17. J'attire

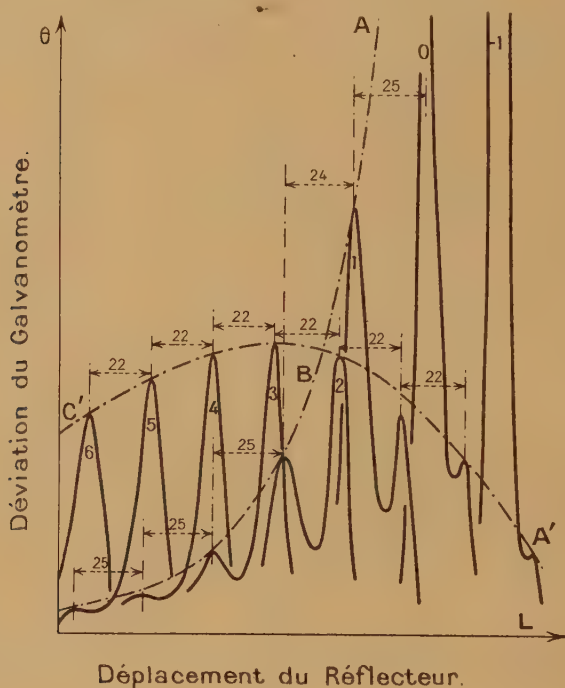


Fig. 17.

l'attention sur le dernier point qui, à ma connaissance, n'a jamais été signalé.

**Inversion des bosses et des pics.** — Jusqu'ici nous avons appelé le maximum principal « pic » par opposition au maximum secondaire « bosse ». Mais en fait cette appellation nous donne à réfléchir en examinant la figure 17. En effet, nous avons admis d'autre part que  $\lambda/2$  était égal à l'écartement entre deux pics consécutifs. Dans ces conditions, nous remarquerons le fait important suivant : nous

voions sur la figure 17 qu'entre  $P_6$  et  $P_5$ ,  $P_5$  et  $P_4$ ,  $P_4$  et  $P_3$ ,  $P_3$  et  $P_2$ , nous avons la même longueur de 22 mm. Mais entre  $P_2$  et  $P_1$  nous n'avons que 5 mm. tandis que entre  $P_1$  et  $P_0$  (décroché) nous avons 25 mm. Si l'oscillateur n'avait pas décroché à ce moment, nous aurions trouvé pour  $P_0$  et  $P_{-1}$  le même écartement de 25 mm. Si nous nous en tenions aux définitions de pic et de bosse dans le sens que nous venons de préciser, nous conclurions que  $\lambda/2$  possède deux séries de valeurs, l'une  $A + 22$  mm. et l'autre  $A + 25$  mm. (\*) et qu'entre les deux séries nous avons une brusque variation de  $\lambda/2$  qui n'est plus que de  $A + 5$  mm. Cette manière de voir les choses, découlant des définitions des pics et des bosses, nous paraît invraisemblable.

Nous avons trouvé plus logique de considérer la chose un peu autrement, ce qui nous amènera à la conclusion d'une inversion des bosses et des pics. En effet, la distinction entre bosses et pics est relative, si l'on veut, à l'importance de « hauteur ». Au lieu de cela, on peut très bien les distinguer par leur situation réciproque, nous dirons par exemple, les sommets de « droite » et les sommets de « gauche ». Si nous considérons cette fois tous les sommets de droite d'une part et tous les sommets de gauche d'autre part, nous verrons alors que leurs espacements sont sensiblement constants : de  $A + 22$  mm. pour les premiers et de  $A + 25$  mm. pour les derniers. Il n'y a donc plus de discontinuité dans l'espacement  $\lambda/2$ , mais bien deux séries de sommets empiétant les uns dans les autres. Nous faisons ressortir, en outre, d'autres propriétés intéressantes, en effet, les sommets de gauche sont prédominants près du quartz tandis que ceux de droite l'emportent à partir d'une certaine distance du quartz. Cela résulte de ce que les sommets de gauche s'amortissent extrêmement vite, suivant la courbe enveloppe ABC, quand le réflecteur s'écarte du quartz,

(\*) A un facteur près.

cependant que les sommets de droite, très faibles au début, montent jusqu'en B, puis s'affaiblissent très lentement suivant la courbe enveloppe A'BC'. Et aux alentours du point B (point d'intersection des deux courbes enveloppes), nous constatons une inversion des bosses et des pics, c'est-à-dire que pour la courbe « 1 » le sommet de gauche, étant plus élevé que celui de droite, est considéré comme pic, tandis que sur la courbe « 2 » c'est le sommet de droite qui doit être appelé pic : ce qui était bosse sur la courbe « 1 » est devenu pic sur la courbe « 2 » et réciproquement, donc il y a inversion entre les deux sortes de sommets pic et bosse.

Cette manière de voir les choses explique d'ailleurs la discontinuité sur la figure 2 donnée par Pielemeier. Nous avons bien deux courbes à amortissement différent, l'une plus rapide pour la région près du quartz et l'autre plus lente à partir d'une certaine distance du quartz ; la zone de discontinuité devrait correspondre à la zone d'inversion (point B) où il se présenterait une légère croissance des pics, au lieu d'une décroissance, chose inexplicable si l'on n'admettait pas notre point de vue.

Je fais remarquer encore qu'ici (fig. 17), nous n'avons qu'une courbe (courbe 1) qui possède son sommet de gauche plus élevé que celui de droite ; la précédente (courbe 0) indique en effet un décrochage de l'oscillateur. Ceci ne porte aucune ombre sur l'explication donnée à propos de la figure 2 de Pielemeier. En effet, nous avons vu dans la sensibilité, que le décrochage dépend du couplage grille plaque ; nous entendons par le mot couplage toute action réagissante l'une sur l'autre (grille et plaque) en particulier, le coefficient d'amplification de la lampe ou d'une façon plus générale le type de lampe employée.

Je m'empresse d'ajouter que la figure 17 n'est qu'un spécimen particulièrement convaincant. La figure 18, au contraire, donne un autre exemple où les sommets sont plus

fondus l'un dans l'autre, malgré cela l'inversion que nous avons signalée est encore très nette.

Nous voyons donc que ce que nous avons l'habitude d'appeler bosses qui sont fortement influencées par l'accord du circuit antirésonant de l'oscillateur, deviennent pics près du quartz. Ces derniers pics ont une décroissance tout à fait anormale (trop rapide). On est donc en droit de conclure

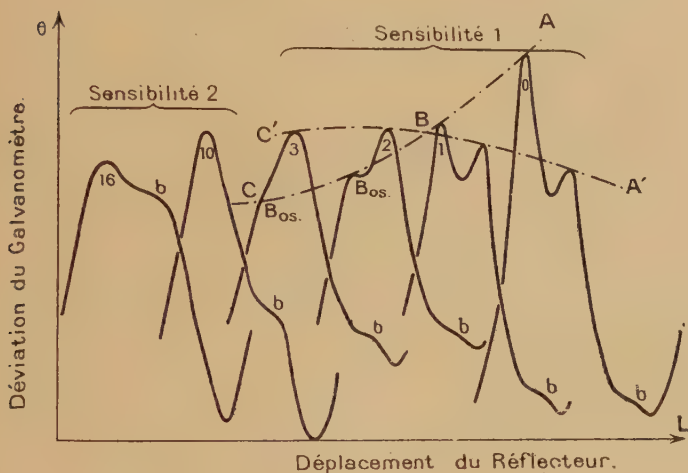


Fig. 18.

que les pics près du quartz ont une nature toute différente de ceux obtenus loin du quartz et pour ces derniers seulement la définition de la longueur d'onde est valable : à savoir que  $\lambda/2$  est la distance entre deux pics consécutifs.

**Déplacement des bosses.** — Si nous examinons encore la figure 17, nous constaterons sur les courbes 2, 3, 4, que les bosses (sommets de gauche) se déplacent par rapport aux pics, c'est-à-dire que l'écartement entre pic et bosse d'une même courbe augmente ; il est de 20 mm. pour la courbe « 2 » ; 22 pour « 3 » et 25 pour « 4 ». La raison de cette

marche se trouve dans la différence d'espacement des sommets des deux séries (22 mm. pour l'une et 25 pour l'autre). Mais cela n'a rien d'absolu puisque nous avons rencontré des quartz pour lesquels les deux séries ont à peu près le même écartement.

Il est intéressant d'autre part de voir, si en s'éloignant davantage du quartz, les sommets de la série gauche (fig. 17) ne recommenceraient pas à augmenter de hauteur. A ce point de vue, nous croyons pouvoir dire catégoriquement que ces sommets s'amortissent très rapidement et pour toujours.

Cependant, nous avons observé chez certains quartz l'existence d'un troisième genre de bosses (*b*, fig. 18) qui se trouvent dans le « creux » avant l'inversion et qui montent la pente de droite pendant que les bosses habituelles (sommets de gauche) descendent rapidement la pente de gauche. Cette montée est lente et régulière et lorsque l'une d'elles arrive au sommet d'un pic, elle provoque des instabilités dans certains cas ; en tout cas, elle provoque une irrégularité dans l'espacement des sommets par l'effet d'entraînement (fig. 18). Ces bosses sont d'autant plus dangereuses qu'elles sont peu apparentes et qu'elles produisent un effet systématique d'entraînement jusqu'au moment où l'une d'elles provoque une discontinuité en passant brusquement de l'autre côté du sommet.

**Irrégularité d'espacement des pics.** — Nous donnons à titre d'indication, le résultat que nous avons obtenu avec le quartz n° 9 qui donne une valeur de  $\lambda/2$  voisine de 0,3 mm. Grâce à la faible longueur d'onde, nous avons pu étudier jusqu'à des distances de  $600 \lambda/2$  la régularité d'espacement des pics. Et pour amplifier l'effet des irrégularités, nous avons procédé comme pour la figure 17, c'est-à-dire en retranchant de  $\lambda/2$  une quantité fixe *A* très voisine de  $\lambda/2$  moyen ; *A* est presque égal à  $\lambda/2$  moyen pour la

courbe 4 (fig. 19). Nous remarquerons ici l'effet capricieux de la variation de température sur la forme de ces courbes. Sur les courbes 1 et 2, on voit apparaître une vague oscillation avec une discontinuité dans l'allure vers le  $400^\circ \lambda/2$ . La régularité de graduation de la règle doit être hors de cause non seulement par l'étalonnage, mais encore par le fait même que ces discontinuités ne se reproduisent pas aux

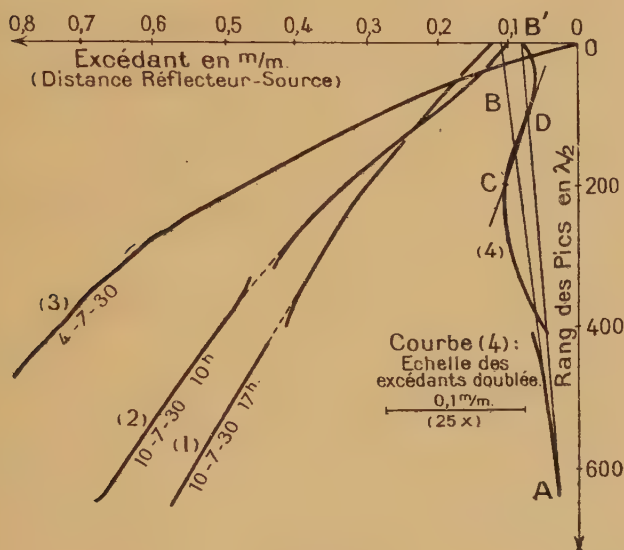


Fig. 19.

mêmes endroits de la règle. Cependant ces irrégularités dans l'espacement des  $\lambda/2$ , à allure sinusoïdale et à discontinuités, ont été retrouvées par trois fois (stabilité de température étant très satisfaisante) mais avec un même quartz. Nous ne pouvons rien ajouter à cela avant que nous n'ayons fait des essais semblables avec un grand nombre de quartz.

Nous pouvons cependant tirer de cet essai une conclusion : si l'on prend un écartement suffisant entre les deux positions extrêmes du réflecteur, la droite joignant les points

représentatifs des deux pics correspondants sur le diagramme (AB' courbe 4, fig. 19) tend à se confondre avec la droite idéale AB. Si, au contraire, on prend deux positions rapprochées quelconques du réflecteur, CD par exemple, la longueur d'onde  $\lambda$  ainsi mesurée peut avoir des valeurs très différentes. On comprend dès lors que pour des ultra-sons de fréquences élevées, la condition favorable est pratiquement toujours réalisée (sauf variation trop rapide de température) tandis que pour des fréquences qui donnent des  $\lambda$  de l'ordre du centimètre, on serait conduit à construire un interféromètre de dimensions très encombrantes (Peut-être introduirait-on ainsi d'autres causes d'erreur ?). Dans ce cas, faute de mieux, on aura soin de choisir deux ou plusieurs positions du réflecteur dont les points représentatifs sur le diagramme ont à peu près la même allure de phase.

Après ce court aperçu sur la complexité du phénomène utilisé dans l'interféromètre de Pierce, et pour terminer, nous dirons que nous devons examiner non seulement ce qui se passe dans la boîte où se propagent les ultra-sons mais encore le quartz qui produit ces ondes et l'oscillateur qui les entretient ; car, en effet, il ne faut pas oublier que nous nous faisons une idée de la propagation des ondes uniquement d'après ce que nous « raconte » le courant plaque de l'oscillateur. Seule une meilleure compréhension des vibrations du quartz et du rôle joué par l'oscillateur nous permettrait de distinguer parmi tout ce que nous rapporte le courant plaque la part revenant à la propagation des ondes. A ce propos, je signalerai que certains quartz ne peuvent pas être employés, soit parce qu'ils donnent des oscillations de relaxation (15), soit qu'ils changent brusquement de direction de vibration par suite de la réaction d'un réflecteur (16). Enfin, j'ai indiqué sur la fig. 11 les points F, G, H

(15) *Comptes rendus*, t. 191 (1930), p. 932.

(16) *Comptes rendus*, t. 191 (1930), p. 768.

donnés par un quartz biseauté qui donne systématiquement une valeur de vitesse par excès et les trois points A, B, C donnés par trois quartz de série « épais » et qui donnent également une valeur brute de vitesse un peu élevée due en grande partie à la variation de température. Cette cause d'erreur éliminée, le point C est ramené en « 3 ». Mais, malgré cela, le point « 3 » est nettement au-dessus du point « 4 » qui correspond à un quartz de série « mince ». Il ne peut être question là d'une discontinuité dans la vitesse (nous avons fait des mesures de contrôle), on ne peut l'expliquer que par l'effet d'une divergence de faisceau (surface émettrice plus petite). Je dirai en passant que le point J nous a servi pour mettre au point notre interféromètre, l'air n'était pas desséché.

### Résumé et conclusion.

Le présent travail a eu pour but l'étude expérimentale de la vitesse de propagation des ondes aériennes de hautes fréquences s'échelonnant entre 40 et 1 000 kilocycles par seconde. La méthode que nous avons employée est, en principe, celle qui a été indiquée par Pierce en 1925 et qui avait conduit ce physicien à conclure que la vitesse de propagation n'est pas tout à fait constante ; il se présenterait en particulier une augmentation très sensible de cette vitesse au voisinage de 42 kilocycles par seconde.

Nous avons repris la question et, au cours de nos recherches, nous avons apporté plusieurs perfectionnements à l'interféromètre acoustique primitivement décrit par Pierce, en particulier la mesure de la température du gaz avec un thermomètre à résistance de platine à très grande surface de contact et le contrôle du parallélisme de la surface de l'émetteur d'ondes ultra-sonores avec celle du réflecteur par l'emploi de l'autocollimation. L'interféromètre acoustique

se compose essentiellement d'une boîte protégée contre le changement de température et les réflexions successives internes. Dans cette boîte, un quartz piézoélectrique dont les vibrations sont entretenues par une lampe triode, est disposé de telle manière qu'un faisceau d'ondes ultrasonores qu'il émet vient frapper un réflecteur, constitué par un plan optique en verre. Celui-ci est rendu parallèle, par autocollimation, à la surface émettrice du quartz ; il peut en outre se déplacer normalement à son plan. L'onde réfléchie revient sur la surface émettrice du quartz avec un retard de phase égal à autant de fois  $2\pi$  qu'il y a de demi-longueurs d'onde entre la source et le réflecteur. Si l'on déplace lentement ce réflecteur, suivant que la phase à l'arrivée de l'onde réfléchie est en concordance ou en discordance avec celle des vibrations du quartz, celles-ci seront favorisées ou contrariées par l'onde réfléchie : le régime vibratoire de l'oscillateur se modifie périodiquement chaque fois que le réflecteur s'est déplacé d'une distance égale à  $\lambda/2$ . D'où une méthode pour mesurer la longueur d'onde dans l'air et on en déduit la vitesse au moyen de la fréquence mesurée d'autre part.

En réalité, cette théorie simple n'est qu'une première approximation. Si l'on augmente tant soit peu la précision, on s'aperçoit alors que la vitesse de propagation ainsi mesurée même avec soin n'est pas constante et elle dépend de la distance du réflecteur à la source. Il est bien entendu que la réaction de l'onde réfléchie sur le régime vibratoire du quartz est d'autant plus énergique que le réflecteur est plus près du quartz. D'autre part, si l'on traduit la variation du régime vibratoire déduite de la variation du courant plaque de l'oscillateur en fonction du déplacement du réflecteur, on trouve pour des régions voisines du quartz une courbe qui, au lieu d'être à allure sinusoidale, présente des maxima secondaires. Ce phénomène est très facile à mettre en évidence ; il a été observé également par Pielemeier

qui voyait par ailleurs une explication de la variation de la vitesse dans la dépendance de cette dernière de l'amplitude des ondes. Cette explication est difficilement acceptable dans notre cas étant donné que l'énergie mise en jeu est extrêmement faible. Un fait reste cependant certain : c'est que la vitesse tend à devenir constante et les maxima secondaires à disparaître à mesure que le réflecteur s'éloigne de la source. Pour mesurer la vitesse, il est donc nécessaire d'opérer à partir d'une certaine distance de la source. Néanmoins, il nous a semblé intéressant d'explorer cette région troublée près du quartz afin de trouver la cause profonde qui influe sur la vitesse dont la variation n'est nullement prévue par la théorie simple que nous avons exposée ci-dessus. C'est ainsi que nous avons relevé un grand nombre de courbes représentant la variation du courant plaque en fonction du déplacement du réflecteur. Ces courbes sont rarement identiques pour deux quartz donnés, mais nous avons pu toujours classer les maxima en deux séries dont l'une à décroissance extrêmement rapide et qui est prédominante près du quartz et l'autre au contraire à décroissance normale, c'est-à-dire en concordance avec la prévision théorique de l'absorption et qui subsiste seule quand on éloigne le réflecteur. Si nous relient les maxima des deux séries par deux courbes enveloppes, au point de leur intersection nous observons toujours une inversion des maxima principaux et des maxima secondaires. Ceci explique d'ailleurs le manque de constance de la longueur d'onde et par suite, en grande partie, la variation de la vitesse. On y trouve également une explication de l'absorption anormale des ondes observée par Pielemeier près du quartz. On peut se demander quelle est la nature de cette série maxima prédominante près du quartz et d'autre part il ne faut pas oublier que nous nous faisons une idée de la propagation des ondes ultra-sonores uniquement d'après les indications du courant plaque de l'oscillateur. Seule une meilleure

compréhension des vibrations du quartz et du rôle joué par l'oscillateur, nous permettrait de distinguer parmi tout ce que nous indique le courant plaque, la part revenant à la propagation des ondes. D'après le résultat de nos recherches effectuées dans ce sens, nous sommes amenés à penser que la série de maxima obtenue près du quartz serait due au couplage serré du réflecteur avec l'oscillateur à quartz tout entier, car nous avons observé que les maxima de cette série sont grandement influencés par la variation des constantes électriques de l'oscillateur.

La vitesse de propagation des ondes ultra-sonores dans l'air sec et privé de gaz carbonique à 0°, entre les fréquences 40 000 et 1 000 000, a été trouvée égale à 331,85 m./s. à  $\pm 1/1\ 000$  près. Dans les limites de cette précision, l'expérience n'indique pas l'existence d'une dispersion appréciable.

---

# DEUXIÈME THÈSE

---

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

**Étude des constantes diélectriques  
aux diverses fréquences.**

VU ET APPROUVÉ :

Paris, le 2 Octobre 1931.

*Le Doyen de la Faculté des Sciences,*

CH. MAURAIN.

VU ET PERMIS D'IMPRIMER :

*Le Recteur de l'Académie de Paris,*

S. CHARLÉTY.









